

**Untersuchungen von durch Sandstrahlen
erzeugten Härtestrukturen in Laubhölzern
und ihre mögliche Auswirkung auf
Holzeigenschaften**

Georges Lesnino

Disbui. München

1989

**Untersuchungen von durch Sandstrahlen
erzeugten Härtestrukturen in Laubhölzern
und ihre mögliche Auswirkung auf
Holzeigenschaften**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

**vorgelegt von
Georges Lesnino
1989**

1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. SCHULZ
 2. Berichterstatter: Prof. Dr. P. SCHOTT
- Tag der mündl. Prüfung: 24. 07. 1989

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	1
2 MATERIAL UND METHODEN	3
2.1 Material	3
2.2 Methoden	5
2.2.1 Sandstrahlverfahren	5
2.2.1.1 Allgemeines	5
2.2.1.2 Sandstrahltechnik zur Untersuchung von Holzproben	7
2.2.1.2.1 Strahlanlagen	7
2.2.1.2.1.1 Injektor-Strahlgerät	7
2.2.1.2.1.2 Druck-Feinstrahlgerät	8
2.2.1.2.2 Einflußgrößen des Strahlverfahrens	9
2.2.1.2.2.1 Bisherige Erkenntnisse über die Methodik	9
2.2.1.2.2.2 Festlegung der Einflußgrößen	13
2.2.1.3 Ausformung und Behandlung der Proben	18
2.2.1.3.1 Artspezifische Härteprofile	18
2.2.1.3.2 Dichteverlauf	19
2.2.1.3.3 Interpretation der Härteprofile	20
2.2.1.4 Erfassung und Auswertung der Härteprofile	20
2.2.1.4.1 Welligkeit	22
2.2.1.4.2 Härteraster	22
2.2.2 Holzeigenschaftsprüfung	23
2.2.2.1 Querdruckfestigkeit	23
2.2.2.2 Quellung	25

3 ERGEBNISSE

3.1 Härteprofile

3.1.1 Zerstreutporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

3.1.1.1 Welligkeit und Jahrringaufbau

3.1.1.1.1 Intraannueller Härteverlauf im adulten Holz

3.1.1.1.2 Intraannueller Härteverlauf im jugendlichen Holz

3.1.1.1.3 Reaktionsholz

3.1.1.1.4 Intraannuelle Dichteschwankungen

3.1.1.1.5 Lage der Jahrringgrenze im Jahrring-Härteprofil

3.1.1.1.6 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

3.1.1.2 Artspezifische Härteprofile

3.1.1.2.1 Beschreibung und Interpretation der Härteprofile

3.1.1.2.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

3.1.2 Halbringporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

3.1.2.1 Beschreibung und Interpretation der Härteprofile

3.1.2.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

3.1.3 Ringporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

3.1.3.1 Beschreibung und Interpretation der Querschnittprofile

3.1.3.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

3.1.4 Tropische Laubhölzer

3.1.4.1 Beschreibung und Interpretation der Querschnittprofile

3.1.4.2 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

3.2 Holzeigenschaften	99
3.2.1 Querdruckfestigkeit	100
3.2.1.1 Interpretation der Kraft-Weg-Diagramme	100
3.2.1.2 Bruchbilder im Querschnittprofil	102
3.2.1.3 Elastizitätsmodul	103
3.2.1.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	105
3.2.2 Quellung	106
4 DISKUSSION	108
4.1 Artspezifische Härtestrukturen	108
4.2 Härteverlauf	111
4.3 Holzeigenschaften	117
4.4 Bedeutung des Sandstrahlverfahrens für die Holzforschung	119
5 ZUSAMMENFASSUNG	121
6 LITERATURVERZEICHNIS	124
7 ABBILDUNGEN	131

1 EINLEITUNG

Im Zeitalter der Mikroelektronik mit ihren kaum abgrenzbaren Anwendungsmöglichkeiten mag es überraschen, daß eine schon lang bekannte Methode der Holzoberflächenbehandlung, das Sandstrahlen, in der Holzforschung wieder Interesse finden kann. Das Sandstrahlen wurde früher als Prüfverfahren des Abnutzungswiderstandes von Holz angewendet, wobei sich diese Methode allerdings sehr bald als ungeeignet erwies (F. KOLLMANN 1937).

H. SCHULZ (1982, 1984, 1985) griff jedoch diese Methode erneut auf und stellte fest, daß sich durch das Sandstrahlen Härteunterschiede auf den Oberflächen von Holzkörpern ohne großen Aufwand darstellen lassen. Mit Hilfe dieses Verfahrens wies er 1985 nach, daß Nadel- und Laubhölzer "in ihren Querschnitten überraschende Härteprofile" zeigen.

So zeichnen sich beispielsweise Birken- (*Betula pendula* Roth) und Aspenholz (*Populus tremula* L.) durch eine diagonal-vernetzte Härtestruktur aus, Linden- (*Tilia platyphyllos* Scop.) und Kirschenholz (*Prunus avium* L.) weisen dagegen eher eine in tangentialer Richtung geordnete Struktur auf. An verschiedenen zerstreutporigen Holzarten, die allgemein als relativ gleichmäßig aufgebaute Hölzer gelten, beobachtete er, daß tangentielle (jahrringparallele) Härte- wellen in zahlreichen, vorwiegend breiten Jahrringen zu finden sind. Im Birkenholz stimmt außerdem die Lage der Jahrringgrenze nicht immer mit der härtesten Holzschicht im Jahrring überein. Demzufolge werden "die üblichen Vorstellungen von porösem Früh- und dichtem Spätholz" relativiert (H. SCHULZ 1985).

H. SCHULZ (1985) äußerte die Vermutung, daß die an einzelnen Holzproben beobachteten Härtestrukturen Bestandteile eines Festigkeits- bzw. Statiksystems darstellen könnten, ebenso wie von anderen Autoren Systeme der Wasserleitung bzw. der Speicherung (H.J. BRAUN 1980, 1982) beschrieben worden sind.

In holztechnologischer Hinsicht ist es vorstellbar, daß sich die beschriebenen, verschieden orientierten Härtestrukturen auf bestimmte Holzeigenschaften auswirken, wie z.B. Querdruck- und Querkzugfestigkeit oder Anisotropie der Quellung und Schwindung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist zunächst, die von H. SCHULZ (1985) an einzelnen Proben einiger Holzarten gewonnenen Erkenntnisse anhand größerer Probenkollektive systematisch zu überprüfen und auf andere Holzarten zu erweitern. Die wichtigsten einheimischen Laubhölzer sowie ausgewählte Tropenhölzer werden dabei mit Hilfe der Sandstrahlmethode auf artspezifische Härtestrukturen untersucht. Darüber hinaus wird versucht, durch Vergleich mit makroskopischen und mikroskopischen Beschreibungen der jeweiligen Hölzer die verschiedenen Härtestrukturen zu interpretieren, nicht zuletzt mit dem Ziel, bisher übersehene, möglicherweise artdiagnostische Holzstrukturmerkmale zu ermitteln.

Die von H. SCHULZ (1985) aufgestellte Hypothese über den möglichen Einfluß von Härtestrukturen auf die Holzeigenschaften wird in einem weiteren Schritt analysiert. Insbesondere Holzarten, die sich durch verschieden orientierte Härtestrukturen unterscheiden werden anhand von einzelnen Quellungsversuchen und Querkzugfestigkeitsprüfungen untersucht.

Schwerpunktmäßig wird die Untersuchung an einheimischen zerstreutporigen Laubhölzern durchgeführt, einerseits, weil diese immer wieder als wenig strukturierte Hölzer im Vergleich zu ringporiger oder tropischen Hölzern beschrieben werden, andererseits, weil sie - abgesehen von der Buche (*Fagus sylvatica* L.) - auf bestimmte Holzeigenschaften kaum oder nicht untersucht worden sind.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Material

In Tabelle 1 sind Herkunft und Umfang der untersuchten Proben nach Holzarten zusammengestellt.

Aus der Holzsammlung des Instituts für Holzforschung der Universität München wurden je Holzart 1 bis 4 Proben für die Beschreibung der nach Sandstrahlbehandlung erzeugten Oberflächenprofile herangezogen (Tab. 1, Spalte *Institutssammlung*). Um den Umfang des Probenmaterials zu erweitern, wurden ferner Holzproben aus dem Handel bezogen (Tab.1, Spalte *Holzhandel*). Die Herkunft dieser Proben konnte nicht näher ermittelt werden.

Des weiteren wurden aus dem Münchener Stadtgebiet ca. 30 cm dicke Ast- und Stammabschnitte von Parkbäumen gesammelt, die im Rahmen von Sanierungs- und Pflegemaßnahmen gefällt worden waren (Tab.1, Spalte *Parkbäume*). Da die Abschnitte bereits auf verschiedenen Lagerplätzen des Baureferats der Stadt München lagen, war auch hier ihre Herkunft nicht mehr genau zu bestimmen.

Schließlich wurden im Universitätswald der Universität München bei Landshut im Dezember 1985 und Februar 1986 vier Bäume gefällt (Tab. 1, Spalte *Universitätswald*): zwei Birken (*Betula pendula* Roth), eine Aspe (*Populus tremula* L.) und ein Schwarzpappelhybrid (*Populus* spp.). Hiervon wurden vom Fällschnitt aus beginnend im Abstand von jeweils 2 m nordmarkierte, 30 cm dicke Stammscheiben entnommen.

Tab. 1: Herkunft und Umfang der untersuchten Holzarten.

UNTERSUCHTE HOLZARTEN	Park- bäume	Universitäts- wald	Holz- handel	Instituts- sammlung	Σ
Einheim. zerstreutporige Holzarten					
<i>Acer campestre</i> L. (Feldahorn)	3				3
<i>A. platanoides</i> L. (Spitzahorn)	5		1	2	8
<i>A. pseudoplatanus</i> L. (Bergahorn)	9		1	3	13
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.* (Roßkast.)	2			2	4
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench (Grauerle)	3			3	6
<i>A. glutinosa</i> (L.) Gaertn. (SchwErle)	5			1	6
<i>Betula</i> spp. (Birke)	4	2	1	3	10
<i>Carpinus betulus</i> L. (Hainbuche)	1		1	3	5
<i>Corylus avellana</i> L. (Gemeine Hasel)	2			1	3
<i>Fagus sylvatica</i> L. (Buche)	1		2	3	6
<i>Platanus</i> spp.* (Platane)				2	2
<i>Populus</i> spp. (Pappel)	3	1		3	7
<i>P. tremula</i> L. (Aspe)	4	1		4	9
<i>Salix</i> spp. (Weide)	2			2	4
<i>Tilia</i> spp. (Linde)	4			3	7
Einheim. halbringporige Holzarten					
<i>Juglans regia</i> L.* (Walnuß)			1	4	5
<i>J. nigra</i> L.* (Schwarznuß)				2	2
<i>Prunus</i> spp. (Kirschbaum)	4		1	3	8
Einheim. ringporige Holzarten					
<i>Castanea sativa</i> Mill.* (Edelkastanie)				2	2
<i>Fraxinus excelsior</i> L. (Esche)	4		1	2	7
<i>Quercus rubra</i> L.* (Roteiche)				3	3
<i>Q.</i> spp. (Weißeiche)	1		1	3	5
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.* (Robinie)	3		1	2	6
<i>Ulmus</i> spp. (Ulme)	4		1	2	7
Tropische Holzarten					
<i>Afzelia</i> spp. (Afzelia)				2	2
<i>Entandrophragma angolense</i> C.DC. (Tiama)				1	1
<i>E. candollei</i> Harms (Kosipo)				1	1
<i>E. cylindricum</i> Sprague (Sapelli)				1	1
<i>E. utile</i> Sprague (Sipo)				2	2
<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. (Khaya)				2	2
<i>Lophira procera</i> A. Chev. (Bongossi)				2	2
<i>Ochroma</i> spp. (Balsa)				2	2
<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum. (Abachi)				2	2

*: eingebürgert

2.2 Methoden

2.2.1 Sandstrahlverfahren

2.2.1.1 Allgemeines

DIN 8200 (Anonymus 1966), die die Begriffe der Strahlverfahrenstechnik festlegt, definiert das Strahlen als "... ein Bearbeitungsverfahren, bei dem ein Strahlmittel auf die zu behandelnde Oberfläche geschleudert wird, um eine bestimmte Oberflächengestalt und -beschaffenheit zu erzeugen.".

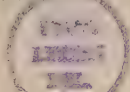
In dieser Definition wird dem Begriff "Sandstrahlen" die Bezeichnung "Strahlen" vorgezogen, weil Quarzsand, das ursprüngliche Strahlmittel, wegen der Silikosegefahr nicht mehr angewendet und durch andere Strahlmittel ersetzt wurde. Früher wurden auch die Begriffe "Sandstrahlblasen", "Sandblasen" oder auch "Sandeln" benutzt. "Sandeln" bezeichnet allerdings auch eine alte Methode der Holzoberflächenbehandlung, wobei ein bestimmtes Sandgemisch mit einem Holzklotz auf der zu behandelnden Holzoberfläche verrieben wird (H. FUSSEDER u. a. 1958). Der Begriff "Sandstrahlen" hat sich jedoch im allgemeinen Sprachgebrauch fest etabliert, deshalb wird er auch in dieser Arbeit verwendet.

Das Sandstrahlen wurde in den USA von B. J. TILGHMAN entwickelt und 1871 patentiert (E. LEHMANN u. W. VOGEL 1928). Seitdem wurde das Verfahren sowohl in technologischer Hinsicht als auch aus arbeitshygienischen Gründen ständig verbessert. So sind heute vollkommen automatisierte, dichtgeschlossene Strahlanlagen in Betrieb.

Im Laufe der technischen Entwicklung haben sich 3 Hauptverfahren bewährt (H. KIRCHHOFF 1975):

a. Das Trocken-Injektor-Strahlverfahren (oder Trocken-Saug-Strahlverfahren): Das Strahlmittel wird mittels eines Injektor-Systems durch Unterdruck an einer Düse abgesaugt und auf die erforderliche Arbeitsgeschwindigkeit beschleunigt.

b. Das Trocken-Druck-Strahlverfahren: Das Strahlmittel wird unter Druck von einem Strahlmittelbehälter zur Austrittsdüse gefördert.



c. Das Naß-Druck-Strahlverfahren: Das Strahlmittel wird in einem Behälter mit Wasser gemischt und zusammen mit dem Wasser über ein Injektor- oder Pumpensystem zur Düse gefördert.

Parallel zur technischen Weiterentwicklung der Strahlverfahren sind - auch durch unterschiedliche Anwendungsbereiche bedingt - ständig neue Strahlmittel auf den Markt gekommen. In Tabelle 2 ist die Aufgliederung der Strahlmittelarten samt Beispielen nach DIN 8200 (Anonymus 1966) vereinfacht wiedergegeben. Diese Strahlmittel werden in verschiedenen Formen (z.B. Glas als Glasperlen oder Glasbruch) und Körnungen (von wenigen μm bis wenigen mm Korndurchmesser) angeboten.

Tab. 2: Einteilung der Strahlmittel (nach DIN 8200).

Flüssige Strahlmittel

Feste Strahlmittel (SM)

- Metallische SM:- Eisen-SM: Hartguß, Stahlguß
 - Nichteisen-SM: Aluminium, Messing
- Mineralische SM:- Natürliche SM: Quarzsand
 - Künstliche SM: Korund, Glas, Schlacken
- Organische SM:- Natürliche SM: Nußschalen, Hartholzmehl
 - Künstliche SM: Polysterol

Das Sandstrahlen wird vorwiegend in der Metallindustrie, insbesondere zur Reinigung, Veredelung, Verformung und Prüfung von Metalloberflächen bzw. Werkstücken angewendet (DIN 8200). Das Verfahren wird auch zum Reinigen von Gebäudefassaden oder zum Entrosten und zur Entfernung von Lack an Metallbrücken oder Schiffswänden eingesetzt.

In der Möbelindustrie wird durch Sandstrahlen, als Verfahren der Oberflächenveredelung, eine reliefartige Verstärkung der Holzmaserung erzeugt. Hierzu eignen sich in erster Linie Fladerbretter aus Nadel- und Eichenholz, die große Härteunterschiede zwischen Früh- und Spätholz aufweisen (W. KNIGGE u. H. SCHULZ 1966). Wie oben

erwähnt, fand früher das Sandstrahlen auch in der Holzforschung als Prüfmethode des Abnutzungswiderstandes Verwendung.

Den an Holzoberflächen angewendeten Sandstrahlmethoden liegt das Prinzip zugrunde, daß durch den Beschuß von Strahlmittelkörnern weichere Zonen bzw. die Oberfläche weicher Hölzer stärker abgerieben werden als dichtere Zonen.

2.2.1.2 Sandstrahltechnik zur Untersuchung von Holzproben

2.2.1.2.1 Strahlanlagen

Für diese Untersuchung standen 2 Strahlanlagen zur Verfügung: Ein Injektor-Strahlgerät (Strahlkabine vom Typ TR 80 der Fa. SIGG) und ein Druck-Feinstrahlgerät (Präzisions-3-Kammer-Druckstrahlgerät vom Typ SANDMASTER FG 3-82 der Fa. BAUMGARTNER Verfahrenstechnik AG.).

2.2.1.2.1.1 Injektor-Strahlgerät (Abb. 1)

Die Anlage besteht aus einer mit Sichtfenster und Handöffnungen versehenen, 85x90x85 cm großen Strahlkabine, einem Strahlmittelbehälter und einer Absaugvorrichtung.

Das Strahlgerät arbeitet nach dem Injektor-Prinzip: Aus einer Luftdüse wird Preßluft in eine Strahlmitteldüse eingespritzt, deren Bohrung der doppelten Bohrung der Luftdüse entspricht. Dadurch entsteht in der Strahlmitteldüse ein Unterdruck, der zum Ansaugen des Strahlmittels aus dem Ablaufbecher führt. In der Injektor-Pistole wird das Strahlmittel der Preßluft beigemischt und in der Strahldüse auf eine Mündungsgeschwindigkeit von bis zu 10 m/s beschleunigt. Nach dem Aufprall auf die Strahlgutoberfläche fällt das Strahlmittel durch ein Sieb, das gröbere abgetragene Probenteilchen zurückhält, in den Strahlmittel-Sammeltrichter. Aus diesem wird das Strahlmittel über den Ablaufbecher und Strahlmittelschlauch der Strahldüse zurückgeführt. Mittels einer verstellbaren Öffnung am Ablaufbecher läßt sich das Strahlmittel-Luftgemisch und somit die Strahlmitteldosierung regulieren. In der Strahlkabine werden die Strahlmittelkörner, die sich beim Aufprallen in kleinere Partikel zerlegen, und die aus dem Strahlgut

herausgeschliffenen Feinteilchen unterhalb einer bestimmten Masse durch die Absaugvorrichtung (Entstauber) dem Strahlmittel-Kreislauf entzogen. Auf diese Weise werden eine konstante Körnungszusammensetzung des Strahlmittels sowie eine ständige Entstaubung der Strahlkabine angestrebt.

Die Injektor-Pistole ist beliebig verstellbar. Sie wird über eine nachträglich eingebaute Motorvorschubeinrichtung mit einer bis 0,5 m/min steuerbaren Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene vor- und rückwärts bewegt. Gegebenenfalls kann die Injektor-Pistole auch freihändig bedient werden. Die verwendete Strahldüse ist eine Borkarbid-Düse von 8 mm Bohrung.

2.2.1.2.1.2 Druck-Feinstrahlgerät

Feinstrahlgeräte sind Strahlanlagen, die mit Düsen von 0,4 bis 1,8 mm Bohrung arbeiten (H. KIRCHHOF 1975). Die kompakte Anlage besteht aus einer mit Sichtscheibe und Handöffnungen versehenen kleinen Arbeitskammer (45x35x28 cm), 3 Strahlmittelbehältern und einer Vibratoranlage (Abb 2).

Im Gegensatz zur Injektor-Anlage stehen die Strahlmittelbehälter unter Druck, so daß das Strahlmittel ohne Gegendruck in die Strahlleitung eingestreut wird. Mittels steuerbaren Vibrationen wird das Strahlmittel durch eine Siebplatte gerüttelt, in der Mischkammer der durchströmenden Preßluft beigemischt und mit ihr durch den Strahlschlauch zur Strahldüse beschleunigt. Nach dem Aufprall auf das Strahlgut wird das Strahlmittel von der Entstaubungsanlage vollständig abgesaugt und nicht wie bei dem Injektor-Verfahren in den Kreislauf zurückgebracht. Folglich wird ausschließlich fabrikneues Strahlmittel auf die Strahlgutoberfläche geschleudert. Die Anlage verfügt nicht über eine Düsenhalterung, so daß die Behandlung der Proben hier freihändig durchgeführt wird.

Luftdruck und Strahlmittel-Luftgemisch können präzise eingestellt werden. Die Anlage erlaubt ferner den sofortigen Einsatz von 3 verschiedenen Strahlmitteln über 3 voneinander unabhängige Druckstrahlssysteme. Dadurch ist die Anlage für gezielte und genaue Un-

tersuchungen an kleinen Objekten sehr gut geeignet. Die Proben können schnell und je nach Zweck der Untersuchung flexibel bearbeitet werden.

2.2.1.2.2 Einflußgrößen des Strahlverfahrens

2.2.1.2.2.1 Bisherige Erkenntnisse über die Methodik

H. SCHULZ (1982, 1984, 1985), F. MAIER (1983), B. HÖLLDORFER (1985) und R. SCHUMANN (1985) haben zahlreiche Grundlagen der Sandstrahlmethodik erarbeitet. Alle diese Untersuchungen wurden mit der Saug-Strahlanlage durchgeführt. Deshalb beziehen sich die folgenden Angaben allein auf diese Anlage.

Aus diesen Grundlagen lassen sich mehrere Parameter definieren, die das Versuchsergebnis beeinflussen können. Tabelle 3 zeigt eine zusammenfassende Auflistung der zu bestimmenden Einflußgrößen und der nach eigenen Vorversuchen festgelegten Strahlbedingungen.

Tab. 3: Einflußgrößen des Sandstrahlverfahrens.

BEREICHE	EIGENSCHAFTEN	PARAMETER	DEFINIERT E STRAHLBEDINGUNGEN	
			Sigg	Sandmaster
Strahlmittel	Härte	Art	Korund	Korund
	Schärfe	Kornform	scharfkantig	
	Korngröße	Körnung	280, 220	280
	Zusammensetzung	Auffrischung	1 kg/15 min	-
Strahlvorgang	Strahlruck	Arbeitsdruck	4 bar	4 bar
		Düsenabstand	15 cm	ca. 10 cm
		Düsenbohrung	8 mm	1,8 mm
		Vorschub	50 cm/min	-
	Strahlzeit	Durchgänge	4 oder 6	-
		Ablaufbecher	10 mm	-
	Durchsatz	Vibration	-	Stufe 5
Strahlgut	Holzfeuchtigkeit	-	unterhalb 15 %	
	Vorbehandlung	-	geschliffen	Mikrotom
	Lage zur Stralachse	Faserwinkel	Q: parallel R: senkrecht T: senkrecht	

a. Strahlmittel

Für die unterschiedlichen Anwendungen des Sandstrahlverfahrens stehen verschiedene Strahlmittelarten zur Verfügung (Tab. 2). H. SCHULZ (1982) setzte mehrere Strahlmittel zur Untersuchung von Holzproben ein. Er stellte zunächst fest, daß künstliche (Kunststoffgranulate) und natürliche (Nußschalengranulate) organische Strahlmittel für diesen Zweck wenig geeignet sind. Befriedigende Ergebnisse erzielte er dagegen mit den künstlichen mineralischen Strahlmitteln Glas (Glasbruch, Glasperlen) und Korund.

Korund, ein Aluminiumoxyd (Al_2O_3), hat sich im Laufe weiterer Holzuntersuchungen mit dem Sandstrahlverfahren gegenüber Glas immer mehr durchgesetzt. In seiner Untersuchung über den Zusammenhang zwischen Rohdichte und Gewichtsverlust nach Sandstrahlbehandlung von Fichtenproben erwirkte B. HÖLLDORFER (1985) die stärkste Korrelation an mit Korund behandelten Klötzchen. Die Korundkörner sind sehr hart, besitzen eine hohe Dichte und bleiben auch bei mehrmaliger Verwendung scharfkantig.

Zur Frage der Körnungswahl ist das Untersuchungsziel entscheidend. Die potentielle Energie gleichförmiger Strahlkörner, d.h. ihre potentielle Abriebwirkung auf die Strahlgutoberfläche, ist gemäß der Formel $E = m \cdot v^2 / 2$ direkt proportional zur Masse der einzelnen Körner.

Stellt man die Bestimmung der Härte bzw. der Rohdichte von Holz in den Mittelpunkt der Untersuchung, sind gröbere Körnungen (z. B. Korund 40-60: 250 bis 500 μm Korndurchmesser) für eine quantitative Analyse gut geeignet; feine Strukturen werden aber dadurch verwischt (B. HÖLLDORFER 1985, R. SCHUMANN 1985). Durch eine feine Körnung lassen sich dagegen kleinflächige und schwache Härteunterschiede deutlich darstellen. Auf diese Weise wird eine starke Auflösung der Oberflächenstruktur erzielt. So verwendete H. SCHULZ (1985) fast ausschließlich Korund 220 (50 bis 80 μm Korndurchmesser) für die Sandstrahlbehandlung von Laubhölzern.

Die Korngrößenzusammensetzung ist ein weiterer Parameter der Strahlmittelqualität. In der Injektor-Druckstrahlanlage ergibt sich durch die Zersplitterung der groben Körner und die teilweise

Rückführung der Splitterteilchen in den Strahlmittel-Kreislauf eine Änderung der Korngrößenverteilung zugunsten niedrigerer Korndurchmesser-Klassen (B. HÖLLDORFER 1985, R. SCHUMANN 1985). Um die Korngrößenzusammensetzung möglichst konstant zu halten, empfiehlt H. SCHULZ (1985) die Nachfüllung von 1100 g frischen Materials nach jeweils 20 Minuten Strahlzeit, während R. SCHUMANN (1985) das gesamte Strahlmittel nach jeweils 5 Minuten Strahlzeit auswechselte.

b. Strahlbedingungen

Strahl Druck: Die kinetische Energie vervierfacht sich bei Verdoppelung der Geschwindigkeit ($E = m \cdot v^2 / 2$). Die Mündungs- bzw. Aufprallgeschwindigkeit der Strahlkörner ist unter anderem direkt vom Strahl Druck abhängig. Demnach wird das Abriebpotential der Strahlkörner vom Arbeitsstrahl Druck stark beeinflusst. Da die Strahlanlagen der Preßluftversorgung des gesamten Instituts angeschlossen sind, unterliegen die Strahl Druckwerte Schwankungen. Wie B. HÖLLDORFER (1985) und R. SCHUMANN (1985) feststellten, nimmt ferner der Anfangs Arbeitsdruck während des Strahlvorganges rasch ab. Die Behandlung ihrer Proben wurde mit einem Arbeitsdruck von 4,5 bar durchgeführt.

Düsenabstand: Der Sandstrahl breitet sich nach Verlassen der Strahldüse kegelförmig aus. Durch Verstellen des Düsenabstandes ändert sich deshalb nicht nur die Aufprallgeschwindigkeit bzw. -energie der Strahlmittelkörner, sondern auch ihre Streubreite auf der Strahlgutoberfläche. Dadurch werden Flächenleistung sowie Gleichmäßigkeit der Oberflächenbehandlung beeinflusst. H. SCHULZ (1985) erzielte befriedigende Ergebnisse bei einem Düsenabstand von 100 bis 150 mm. In den Untersuchungen von B. HÖLLDORFER (1985) und R. SCHUMANN (1985) wird ein Düsenabstand von 150 mm festgelegt. Es ergibt sich dadurch bei Verwendung der 8-mm-Düse eine Streubreite von 30 mm auf einer senkrecht zum Sandstrahl liegenden Probenoberfläche.

Strahlzeit: Die Dauer der Einwirkung des Sandstrahlens auf die Strahlgutoberfläche ist eine Funktion der Geschwindigkeit des Düsenvorschubes und der Durchgangshäufigkeit. Diese Einflußgrößen sind den jeweiligen Untersuchungszielen entsprechend zu bestimmen. So finden sich in den Arbeiten von H. SCHULZ (1982, 1984, 1985) außer einer Angabe über eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,50 m/min keine Hinweise hinsichtlich Durchgangshäufigkeit bzw. Strahlzeit. Der Härte der jeweiligen Holzarten entsprechend wurden die Probenoberflächen kürzer oder länger behandelt. B. HÖLLDORFER (1985) und R. SCHUMANN (1985), die den Gewichtsverlust von Holzproben nach Sandstrahlbehandlung unterschiedlicher Intensitätsstufen ermittelten, verdeutlichen den Einfluß der Strahlzeit auf die Oberflächengestalt. Sie zeigten, daß der erste Strahldurchgang unabhängig von der verwendeten Strahlmittelkörnung eine zugleich präparierende wie polierende Wirkung auf die Probenoberfläche ausübt, während der Abrieb gering ausfällt. Im Laufe der folgenden Durchgänge nimmt dann die abgeriebene Holzmasse bis zu einer optimalen Durchgangshäufigkeit proportional zu.

c. Eigenschaften der Holzproben

Um Artefakte und folglich falsche Interpretationen der entstandenen Oberflächenprofile zu vermeiden, werden an das Strahlgut bestimmte Anforderungen gestellt.

Nach H. SCHULZ (1982) sollten die Strahlproben eine Holzfeuchtigkeit von 15 % nicht überschreiten. Ferner sind Unebenheiten in der Probenoberfläche, wie Werkzeugspuren oder Risse, vor der Sandstrahlbehandlung durch sorgfältiges Schleifen zu beseitigen.

Artefakte können aber auch infolge falscher Orientierung der Proben zur Sandstrahlachse entstehen. Nach F. MAIER (1983) ergibt sich eine Schattenwirkung der härteren Spätholzschichten auf das wegen der schrägen Lage darunterliegende weiche Frühholz, wenn die Jahrringgrenzen nicht genau in der Sandstrahlebene liegen.

2.2.1.2.2.2 Festlegung der Einflußgrößen

Die in mehreren Untersuchungen unter verschiedenen Zielsetzungen gesammelten Erfahrungen in der Methodik des Sandstrahlens von Holzproben wurden dem Untersuchungsziel entsprechend durch Vorversuche kritisch überprüft.

Durch die Behandlung von Holzproben mit dem Sandstrahl sollte in erster Linie eine möglichst deutliche Darstellung zugleich feiner wie gröberer Härtestrukturen in den Probenoberflächen erzielt werden. Zu definieren waren demnach Strahlbedingungen, unter denen sich ausdrucksvolle Strukturen sowohl in weichen als auch in härteren Hölzern erzeugen lassen (Tab. 3, Spalte: *Definierte Bedingungen*). So konnten die Voraussetzungen für einen objektiven Vergleich der Härtestrukturen verschiedener Holzarten erfüllt werden.

a. Strahlmittel

Für alle Untersuchungen wurde Korund verwendet. Am Beispiel der Birke deutete H. SCHULZ (1985) an, daß die Gefäße bzw. deren Anordnung die Feinstruktur sandbestrahlter Probenquerschnitte zu bestimmen scheinen. Demnach sollte der Gefäßdurchmesser als Orientierungsgröße für die Körnungswahl dienen. In Tabelle 4 sind die Gefäßdurchmesser der untersuchten Holzarten den Korngrößen von Korund 280, 220 und 100 gegenübergestellt. Nach Angaben des Herstellers setzen sich Korund 280 aus Körnern von 22 bis 59 μm , Korund 220 aus Körnern von 50 bis 80 μm und Korund 100 aus Körnern von 130 bis 150 μm Durchmesser zusammen. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, daß, während die Gefäße kleinporiger Holzarten noch im Korngrößenbereich von Korund 280 liegen, lediglich die Frühholzgefäße der ringporigen Hölzer sowie die Gefäße grobporiger Tropenhölzer von Korund 100 gerade noch erfaßt werden.

Tab. 4: Vergleich zwischen Gefäßdurchmesser der untersuchten Holzarten und Korndurchmesser der Strahlmittel Korund 280, 220 und 100 (Gefäßdurchmesserangaben nach D. GROSSER 1977, R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985).

HOLZARTEN	GEFÄSSDURCHMESSER tangential in μm	KÖRNUNGSGRÖßEN		
		280 40	220 65	100 140 μm
Gemeine Hasel	... 60	(*)	(*)	-
Ulme -SpH.	20 ... 60	*	(*)	-
Roßkastanie	30 ... 60	*	(*)	-
Vogelkirsche	35 ... 75	*	(*)	-
Hainbuche	15 ... 80	(*)	(*)	-
Pappel	20 ... 80	*	(*)	-
Schwarzerle	30 ... 80	*	(*)	-
Linde	20 ... 90	*	(*)	-
Weide	20 ... 90	*	(*)	-
Roteiche -SpH.	35 ... 95	*	(*)	-
Buche	30 ... 100	*	(*)	-
Platane	50 ... 100	*	*	-
Bergahorn	30 ... 110	*	(*)	-
Edelkastanie -SpH.	35 ... 125	*	(*)	-
Esche -SpH.	15 ... 130	(*)	(*)	-
Birke	30 ... 130	*	(*)	-
Stieleiche -SpH.	30 ... 140	*	(*)	(*)
Robinie -SpH.	70 ... 140	*	*	(*)
Tiana	110 ... 200	*	*	(*)
Balsa	130 ... 200	*	*	(*)
Kosipo	70 ... 215	*	*	(*)
Robinie -FrH.	130 ... 220	*	*	*
Khaya	30 ... 230	*	(*)	(*)
Sapelli	65 ... 230	*	*	(*)
Gemeine Walnuß	60 ... 240	*	*	-
Afzelia	145 ... 245	*	*	(*)
Sipo	90 ... 250	*	*	(*)
Abachi	70 ... 280	*	*	(*)
Roteiche.-FrH.	70 ... 280	*	*	*
Schwarznuß	60 ... 300	*	*	(*)
Edelkastanie -FrH.	150 ... 300	*	*	*
Ulme -FrH.	130 ... 340	*	*	*
Esche -FrH.	60 ... 350	*	*	(*)
Stieleiche -FrH.	150 ... 350	*	*	*
Bongossi	180 ... 380	*	*	*

FrH., SpH.: Frühholz bzw. Spätholz bei ringporigen Holzarten;

* : Korngrößen < Gefäßdurchmesser;

(*) : Korngrößen teilweise > Gefäßdurchmesser;

- : Korngrößen > Gefäßdurchmesser.

Die Abbildungen 3a, 4a und 5a zeigen am Beispiel einer Pappelholzprobe den direkten Vergleich zwischen Gefäßgrößen und Korngrößenzusammensetzung der verschiedenen Korundkörnungen. In den Abbildungen 3b, 4b und 5b sind die nach Sandstrahlbehandlung mit den verschiedenen Körnungen jeweils erhaltenen Querschnittprofile gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß durch Verwendung einer feineren Körnung (Korund 280) eine scharfe Auflösung der Oberflächenstrukturen erzielt wird (Abb. 3b). Deshalb wurde zur Untersuchung der artspezifischen Härtestrukturen vorwiegend Korund 280 eingesetzt.

Zur Darstellung gröberer Härtestrukturen, wie z. B. des Jahrringaufbaues oder der Abgrenzung von Jahrringen, wurde dagegen Korund 220 verwendet. Wie Abbildung 4b zeigt, sind damit Feinstrukturen, auch wenn sie nicht mehr so ausgeprägt sind wie mit Korund 280 (Abb. 3b), noch wahrzunehmen, während die Welligkeit der sandbestrahlten Oberfläche deutlicher erscheint.

Die grobe Körnung von Korund 100 erwies sich als wenig geeignet. Durch den Aufprall der groben Körner wird die Feinstruktur weitgehend verwischt (Abb. 5b). Folglich wurde Korund 100 mit Ausnahme einiger gezielter Untersuchungen nicht eingesetzt.

Die vorliegenden Erkenntnisse wurden an Probenoberflächen gewonnen, die mit dem Sandmaster, d.h. mit fabrikneuem Strahlmittel, behandelt worden sind. In der Injektor-Strahlanlage aber ergibt sich nach kurzer Strahlzeit eine Änderung der ursprünglichen Korngrößenzusammensetzung (vgl. S. 10).

Um den Umfang und die Auswirkung dieser Änderung abschätzen zu können, wurde der maximale Durchmesser einzelner Körner an Stichproben aus fabrikneuem und aus durch regelmäßiges Nachfüllen (H. SCHULZ 1985) aufgefrischtem, gebrauchtem Korund 280 und 220 ermittelt (halbautomatische Bildanalyse, Videoplan der Fa. Kontron). Die Meßergebnisse sind am Beispiel von Korund 280 in Form von Histogrammen in Abbildung 6 dargestellt. Es zeigt sich, daß trotz regelmäßiger Auffrischung die ursprünglich normalverteilte Korngrößenzusammensetzung im gebrauchten Zustand als rechtsschiefe Verteilung erscheint.

Durch die Verschiebung der ursprünglichen Korngrößenzusammensetzung zugunsten kleinerer Korndurchmesser ergibt sich dann eine bessere Auflösung der in der Injektor-Strahlanlage erzeugten Oberflächenstrukturen.

b. Strahlbedingungen

Injektor-Strahlanlage

In der Strahlkabine wurden zunächst die Holzproben je nach Form und Größe durch verschiedenartige Halterungen am Bodenrost befestigt (Abb. 7). Mit der Vorschubeinrichtung wurde dann die Strahldüse vor- und rückwärts über die Probenoberfläche geführt. Jeweils nach Behandlung eines Streifens wurde die Düse seitlich versetzt, bis die gesamte Oberfläche bzw. der zu untersuchende Oberflächenabschnitt vollständig bestrahlt wurde.

Um den in der Preßluftversorgung des Instituts gelegentlich vorkommenden Druckschwankungen zu begegnen (vgl. S. 11), wurde ein Eingangsdruck von 5,0 bar eingestellt. Dieser entspricht etwa 80 % des maximal erreichbaren Preßluftdruckes von 6,4 bar. Nach kurzem Leerlauf nahm der effektive Arbeitsdruck einen relativ konstanten Wert von 4,0 bar ein. Beim gelegentlichen Unterschreiten dieses Druckwertes während des Strahlvorganges wurde die Behandlung unterbrochen, bis sich wieder ein Eingangsdruck von 5,0 bar einstellte.

Der Abstand zwischen Strahldüse und Probenoberfläche betrug 150 mm mit einer entsprechenden Streubreite von 30 mm. Dabei wurde festgestellt, daß die Aufprallenergie der Strahlkörner innerhalb des Strahlkegels zentrifugal abnimmt. Bei streifenweisem (vor- und rückwärts) Sandstrahlen wird dadurch eine bogenförmige Vertiefung in der Probenoberfläche erzeugt. Um eine gleichmäßige Abriebwirkung über die gesamte Probenoberfläche zu erzielen, wurde nach jeder Durchgangsserie die Strahldüse um 15 mm seitlich verschoben (Abb. 8).

Über die Vorschubgeschwindigkeit der Strahldüse und die Durchgangshäufigkeit läßt sich die Strahlzeit bestimmen. Im Laufe der Vorversuche hat sich gezeigt, daß nach 4 bis 6 Durchgängen bei ei-

ner Vorschubgeschwindigkeit von 0,50 m/min eine kontrastscharfe Oberflächenstruktur sowohl in weichen als auch in härteren Jahrringbereichen bzw. Hölzern erzielt werden konnte.

Der Strahlmitteldurchsatz, d.h. die Gewichtsmenge an Strahlmittel, die in einer Zeiteinheit von der Strahlanlage durchgesetzt wird (DIN 8200 1966), läßt sich am Ablaufbecher durch eine verstellbare Öffnung regulieren (vgl. S. 7). Sämtliche Untersuchungen wurden mit einer Ablaufbecher-Öffnung von 10 mm durchgeführt.

Fein-Druckstrahlgerät (Sandmaster)

Da die kleine Kabine weder über eine Düsenhalterung noch über eine Vorschubeinrichtung verfügt, konnte hier die Düse nur freihändig geführt werden.

Bei der an überwiegend kleinen Proben (Klötzchen von maximal 30x15x20 mm Kantenlänge) durchgeführten Behandlung wurde die Strahldüse mit Kreisbewegungen bei einem Abstand von ca. 10 cm möglichst gleichmäßig über die Probenoberfläche bewegt.

Hierbei betrug der Arbeitsdruck 5,0 bar, nachdem ein Eingangsdruck von 6,0 bar eingestellt wurde.

Die Behandlung wurde in dieser Weise solange fortgesetzt, bis eine deutliche Härtestruktur über die ganze Oberfläche erarbeitet worden war (Abb. 9).

Der Strahlmitteldurchsatz wurde bei einer Vibrationsintensität der Stufe 5 konstant gehalten.

c. Eigenschaften der Holzproben

Die in frischem Zustand gesammelten Proben aus dem Universitätswald und dem Münchener Stadtgebiet wurden schonend auf eine Holzfeuchtigkeit von 12 % künstlich getrocknet. Dadurch sollte die Gefahr der Rißbildung infolge von Trocknungsspannungen verringert werden. Die Holzfeuchtigkeit der anderen untersuchten Proben ("Holzhandel" und "Institutssammlung") lag stets unter 15 %.

Bei der Probenausformung wurde auf eine genaue Orientierung der verschiedenen Schnittebenen zum Faser- bzw. Jahrringverlauf geachtet, um eine Schattenwirkung des Sandstrahles durch härtere Holzschichten zu vermeiden.

Vor der Sandstrahlbehandlung wurden die Probenoberflächen auf einem Bandschleifer sorgfältig abgeschliffen. An kleinen Probenkörpern wurde durch Mikrotomanschnitt eine optimale Oberflächenqualität erzielt.

2.2.1.3 Ausformung und Behandlung der Proben

2.2.1.3.1 Artspezifische Härteprofile

Zur Untersuchung der Härteprofile in den Quer-, Radial- und Tangentialschnittebenen der verschiedenen Holzarten (Tab. 1) wurden 3 cm dicke Stammscheiben bzw. Stammscheibenabschnitte aus dem Probenmaterial "Parkbäume", "Universitätswald" und "Holzhandel" herausgetrennt (Abb. 10). Die Proben der "Institutssammlung" wurden nicht weiter ausgeformt, da sie bereits in Form von dünnen (10 bis 20 mm Dicke) Querschnitten oder als Prismen vorlagen.

Nach dem Abschleifen wurden die Proben vorwiegend auf ihrem Querschnitt in der Injektor-Strahlanlage unter den oben definierten Strahlbedingungen (Tab. 3) mit Korund 280 bearbeitet.

Zur Untersuchung eines möglichen Einflusses der Himmelsrichtung und Höhe im Baum auf Härtestrukturen und Jahrringaufbau wurden weitere Stammscheiben aus dem Probenmaterial "Universitätswald" (Hybrid-Pappel, Aspe und Birke: Tab. 1) herangezogen. Von diesen wurden Radialstreifen von jeweils 30 mm Breite und Höhe aus den 4 Himmelsrichtungen und in unterschiedlichen Stammhöhen entnommen (Abb. 10).

Die Streifenquerschnitte wurden unter den vorstehend definierten Bedingungen in der Injektor-Strahlanlage ebenfalls mit Korund 280 behandelt.

2.2.1.3.2 Dichteverlauf

Nach der von H. SCHULZ (1982) entwickelten und erprobten Methode zur Darstellung des Härte- bzw. Dichteverlaufes über den Stammdurchmesser wurden Dreieckproben aus den restlichen Stammscheiben "Parkbäume" und "Universitätswald" herausgeschnitten (Abb. 10). Abbildung 11a zeigt die Entnahme der Probenkörper, Abbildung 11b ihre Ausformung und Abmessungen. Anschließend wurden die Dreieckproben in einer speziell zu diesem Zweck angefertigten Halterung unter den vorstehend definierten Bedingungen mit Korund 220 und 4 Durchgängen sandbestrahlt. Wie Abbildung 11c zeigt, wurde hierbei die Strahldüse senkrecht zum Faserverlauf in tangentialer Richtung über den Probenkörper geführt.

Zur Prüfung der Zuverlässigkeit der Dreieckproben-Methode wurde an 100 bzw. 200 μm dicken Tangentialschnitten die Rohdichte bestimmt und mit der an den Dreieckproben gemessenen Profilhöhe (h) verglichen (Abb. 11b).

Zu diesem Zweck wurden unmittelbar unterhalb der Entnahmestelle der Dreieckproben Leisten von 10x10 mm Breite herausgeschnitten. An beliebigen Stellen wurden 15 mm lange Klötzchen entnommen, die anschließend schonend in destilliertem Wasser unter Vakuum bei Zimmertemperatur erweicht wurden.

Die Anfertigung der Tangentialschnitte erfolgte mit dem Schlittenmikrotom bei einer Dicke von 100 und 200 μm . Nach der Trocknung wurde ihre Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit von ca. 6 % nach der Volumen-Gewicht-Methode ermittelt und in einem Rohdichte-Diagramm aufgetragen.

Die entsprechenden Abschnitte der Dreieckproben wurden mit einer Vergrößerung von 10:1 photographiert. So konnte die Höhe des verbleibenden Holzes, als Härte-Diagramm auf der Photographie dargestellt, jeweils in einem Intervall von 1 mm (100 μm x 10) bzw. 2 mm (200 μm x 10) auf Millimeterpapier übertragen und gemessen werden.

2.2.1.3.3 Interpretation der Härteprofile

Für gezielte Untersuchungen, wie Vergleiche zwischen Härtestrukturen und anatomischem Holzaufbau oder den Erklärungsversuch auffälliger Strukturen, wurden zusätzlich Klötzchen von einer Kantenlänge bis ca. 30x15x20 mm aus dem vorhandenen Probenmaterial herausgeschnitten.

Zur Mikroschnittenanfertigung mit dem Schlittenmikrotom wurden die Klötzchen schonend in einem Wasser-Glycerin-Gemisch (ca. 10:1) unter Vakuum und bei Zimmertemperatur erweicht. Anschließend konnten 25 µm und 100 µm dicke Mikroschnitte, vorwiegend als Querschnitte, hergestellt werden. Nach Anfärbung mit Safranin und Astrablau (für besseren Kontrast und Zugholznachweis) und nach Entwässerung in der Alkoholreihe wurden die 25 µm dicken Schnitte in Euparal (Kunstharz) eingebettet.

Die Klötzchen und die 100 µm dicken Schnitte wurden danach bei Zimmertemperatur auf eine Holzfeuchtigkeit von ca. 10 bis 12 % getrocknet. Schließlich wurden die durch die Schnittenanfertigung optimal glatten Oberflächen in dem Sandmaster wie oben beschrieben bestrahlt. Dieses Verfahren ermöglichte einen unmittelbaren Vergleich zwischen dem anatomischen Aufbau des Mikroschnittes und dem erhaltenen Härteprofil an der gleichen Stelle.

2.2.1.4 Erfassung und Auswertung der Härteprofile

Zum besseren Verständnis der Strukturbeschreibung werden zunächst die in dieser Abhandlung gebrauchten Begriffe wie folgt definiert:

- Härteprofil: gesamte Oberflächengestalt einer sandbestrahlten Probenschnittebene als Querschnitt-, Radial oder Tangentialhärteprofil.
- Härtediagramm: Seitenansicht durch Projektion des Härteprofils eines Querschnittes bzw. einer Dreieckprobe in die Radialebene (Abb. 11b).

- Welligkeit: übergeordnete, durchgehend jahrringparallel verlaufende Struktur eines Härteprofils (Abb. 12); entspricht dem nach DIN 4760 in der Oberflächenmeßtechnik gebrauchten Begriff der Welligkeit oder "Gestaltabweichung 2. Ordnung" (H.-P. GRODE 1981). Die Welligkeit besteht aus folgenden Strukturelementen:
 - Härtewelle: wellenförmige, tangential verlaufende harte Schicht (Abb. 12);
 - Härteband: mauerartig hervortretender, harter Tangentialstreifen (Abb. 12 u. 13);
 - Graben: besonders stark abgeriebene, tangential verlaufende weiche Schicht (Abb. 12 u. 13).
- Härteraster: Feinstruktur des Härteprofils innerhalb des Jahrringes; entspricht dem Begriff der Rauigkeit oder "Gestaltabweichung 3. bis 5. Ordnung" nach DIN 4760 (H.-P. GRODE 1981). Der Härteraster setzt sich aus folgenden Strukturelementen zusammen (Abb. 13):
 - Härterippe: dünner, in der Probenoberfläche erhalten gebliebener harter Streifen;
 - Rinne: dünner, deutlich tiefer als das umgebende Gewebe abgeriebener weicher Streifen;
 - Krater: rundliche, trichterförmige Einsenkung der Oberfläche.
- Jahrringgrenze: Trennungsebene zwischen dem im Laufe einer Vegetationsperiode gebildeten Holzgewebe und den am Anfang der nächsten Periode neu gebildeten Holzzellen.
- Frühholz, Übergangsholz, Spätholz: Die Begriffe sind in dieser Abhandlung als rein räumliche Jahrringabschnitte zu verstehen; sie haben deshalb weder eine physiologische noch eine anatomische Bedeutung.

2.2.1.4.1 Welligkeit

Über die Welligkeit sollte, wenn eine gesicherte Beziehung zwischen Abrieb und Dichte besteht, der Dichteverlauf innerhalb der einzelnen Jahrringe untersucht werden.

Dabei wurde an den sandbestrahlten Querschnitten der Stammscheiben bzw. -streifen mit ihren zugehörigen Dreieckproben zunächst der Härteverlauf im Jahrring beschrieben. Darüber hinaus wurden an mehreren Stämmen die Jahrringbreite, die Lage der Jahrringgrenze im Härteprofil und die Anzahl der Härtebänder und -wellen (Dichteschwankungen) jahrringweise ermittelt.

Die Jahrringbreite wurde an einem nachgebauten Eklund-Gerät gemessen. Die Lage der Jahrringgrenze, der Härteverlauf im Jahrring und die Anzahl der Härtewellen und -bänder wurden unter einem Stereomakroskop (Fa. American Optical Corporation) mit einer Vergrößerung von ca. 10:1 ermittelt.

2.2.1.4.2 Härteraster

Die Härteraster der jeweiligen Holzarten wurden unter dem Stereomakroskop mit einer Vergrößerung von ca. 10:1 bis 40:1 untersucht. Ihre Interpretation erfolgte anhand der zugehörigen Mikroschnitte, von mikroskopischen Präparaten aus der Institutssammlung sowie holzanatomischen Beschreibungen aus der Literatur (z.B. E. SCHMIDT 1941, D. GROSSER 1977, R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985).

Die Härteprofile und ihre zugehörigen Mikroschnitte wurden schließlich durch photographische Aufnahmen dokumentiert.

Darüber hinaus wurde an einigen Härteprofilen eine berührungslose Meßmethode erprobt. Das benutzte Gerät, ein Laser-Abstandssensor der Fa. LOT, ermittelt durch Laserstrahlreflexion nach dem Triangulations-Meßverfahren Höhenunterschiede zu einem Bezugsniveau mit einer Genauigkeit von wenigen μm . Die Meßsignale werden in Digitalwerte umgewandelt und können gleichzeitig mit der von einem Wegmesser registrierten Meßstrecke in Form eines Diagramms auf einem Schreiber dargestellt werden.

2.2.2 Holzeigenschaftsprüfung

Nach der Hypothese von H. SCHULZ (1985) über den Einfluß der Härtestrukturen auf die Holzeigenschaften sollen verschieden orientierte Härteraster eine unterschiedliche Ausprägung der Queranisotropie bewirken. Zur Prüfung dieser Hypothese wurde in verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf das Verhalten von Querproben unter Querdruckbelastung sowie bei der Quellung analysiert. Hierbei wurden schwerpunktmäßig zerstreutporige Holzarten untersucht, die durch unterschiedliche Härteraster gekennzeichnet sind.

Zu diesem Zweck wurden Holzproben mit den einheitlichen Abmessungen von 30x15x20 mm Kantenlänge verwendet. Aus den restlichen Stammscheiben "Parkbäume" und "Universitätswald" (Tab. 1, Abb. 10) wurden zunächst Scheibenabschnitte von 20 mm Dicke entnommen. Diese wurden dann streifenweise in Klötzchen von 30 mm Länge und 15 mm Breite aufgeschnitten. Somit lagen unterschiedlich orientierte Holzklötzchen als radiale, tangential oder diagonale Querproben vor (Abb. 14).

2.2.2.1 Querdruckfestigkeit

Die Querproben wurden in Richtung ihrer Hauptachse an einer Instron-Universal-Prüfmaschine geprüft. Unter einer Höchstlast von 500 N und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min wurde die Druckspannung bis zu einer Zusammendrückung von 3 mm (= 10 % Stauchung) über die EDV-Anlage registriert und als Kraft-Weg-Diagramm dargestellt.

Die Festigkeitsprüfung erfolgte überwiegend an normalklimatisierten (nach DIN 50 014) Proben. Darüber hinaus wurde aber auch eine Probenserie in nassem Zustand mit dem Ziel geprüft, die elastischen Verformungen der durch Wasseraufnahme erweichten Proben während der Zusammendrückung beobachten zu können.

Um einen möglichen Einfluß der Härtestrukturen auf die Bruchformen zu verdeutlichen, wurde nach Sandstrahlbehandlung der Querschnittebenen eine weitere Probenserie unter den gleichen Bedingungen zusammengedrückt. Anschließend wurden die makroskopisch sichtbaren Bruchstellen beschrieben.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit quer zur Faser bereitet aber Schwierigkeiten (E. SUENSON 1938; F. KOLLMANN 1959; J. BODIG 1965; DIN 52 192; Anonymus 1979 b): Während der Zusammendrückung der Probenkörper brechen die schwächsten Zellelemente zuerst ein und das Gewebe verdichtet sich, ohne daß es zu einem deutlichen Bruch kommt. Deshalb läßt sich die Querdruckfestigkeit nur über die Druckspannung an der Proportionalitätsgrenze oder über diejenige Druckspannung, die einer definierten Stauchung entspricht, ermitteln. Die Proportionalitätsgrenze ist allerdings, wie Abbildung 15 zeigt, nicht immer deutlich zu bestimmen. Deshalb wurde der Druck-Elastizitätsmodul als Vergleichsgröße herangezogen.

Der Elastizitätsmodul ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines belasteten Festkörpers gegenüber einer Formänderung. Er wird als reziprokes Maß für die Größe der elastischen Formänderungen bei Zug-, Druck- oder Biegebeanspruchung ermittelt (F. KOLLMANN 1951). Die Berechnung des Elastizitätsmoduls erfolgte über ein EDV-Programm zur Druckfestigkeitsprüfung nach der Formel (1) (DIN 52 192; Abb. 15):

$$E_D = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L}{a \cdot b \cdot (l_2 - l_1)} \quad [N/mm^2] \quad (1).$$

E_D : Querdruck-Elastizitätsmodul;

F_1, F_2 : Widerstandskraft;

L : Probenlänge vor der Belastung;

a, b : Kantenmaße der gedrückten Fläche;

l_1, l_2 : Längenänderung während der Belastung.

2.2.2.2 Quellung

Nach DIN 52 184 (Anonymus 1979 a) sind zur Ermittlung der radialen und tangentialen linearen Quellmaße Proben mit quadratischem Querschnitt vorgeschrieben. In der vorliegenden Untersuchung wurden dagegen Prüfkörper mit rechteckigem Querschnitt (30x15 mm) verwendet. Dadurch sollte eine Quellungsrichtung bevorzugt werden, um mögliche artspezifische Unterschiede in der Quellungsanisotropie hervorzuheben.

Die Messungen wurden nach DIN 52 184 bei 3 Holzfeuchtigkeitsstufen durchgeführt: In darrtrockenem, in nach DIN 50 014 (Anonymus 1975) normalklimatisiertem (Holzfeuchtigkeit $u = 12 \%$) und in nassem Zustand ($u > \text{Fasersättigung}$). Dabei wurden über die EDV-Anlage des Instituts das Probengewicht (zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit und der Rohdichte) mit einer Analysenwaage auf 0,01 g und die Probenmaße mit einer Meßuhr auf 0,01 mm gemessen und registriert. Als Quellrichtung galt der zwischen Jahrringverlauf und Hauptachse der Querproben gemessene Winkel (0° bis 90°). Die linearen Quellmaße wurden in Richtung der Hauptachse nach der Formel (2) (nach DIN 52 184: Anonymus 1979) ermittelt:

$$\alpha = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

α : lineares Quellmaß in einer Querrichtung;

l : Maße der Querprobe in Richtung der Hauptachse,

l_0 : bei einer Holzfeuchtigkeit von 0 %,

l_1 : bei einer Holzfeuchtigkeit von 12 % bzw.

über der Fasersättigungsfeuchte.

3 ERGEBNISSE

3.1 Härteprofile

Über die Beschreibung der Welligkeit und des Härterasters von Härteprofilen wird versucht, den Dichteverlauf und den anatomischen Aufbau innerhalb des Jahrringes darzustellen.

Nach der im Kapitel 2.2.1.3 beschriebenen Methode wurden Härteprofile aus Dreieckproben mit den zugehörigen Rohdichte-
profilen verglichen. Die Ermittlung der Rohdichte erfaßte jeweils 2 bis 5 Jahrringe aus verschiedenen zerstreutporigen Holzarten (Pappel, Linde, Roßkastanie, Schwarzerle, Grauerle, Bergahorn, Spitzahorn und Hainbuche) mit insgesamt 1077 Tangential-
schnitten.

In Tabelle 5 sind die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der ermittelten Rohdichten für die untersuchten Holzarten wiedergegeben. Die gefundenen Werte liegen meistens im Bereich der von F. KOLLMANN (1951) angegebenen Darrdichten.

Tab. 5: An Tangentialschnitten ermittelte Rohdichten der untersuchten Holzarten
(JR: Anzahl der erfaßten Jahrringe; n: Anzahl der Tangentialschnitte).

HOLZARTEN	JR	n	Rohdichte (r_s) [g/cm ³]	Rohdichte (r_0) [g/cm ³] nach KOLLMANN (1951)
Schwarzerle	2	96	0,33...0,42...0,51	0,38...0,49...0,60
Grauerle	3	154	0,38...0,46...0,53	---
Roßkastanie	3	97	0,42...0,48...0,53	0,51
Pappel	2	100	0,40...0,50...0,60	0,37...0,41...0,52
Bergahorn	3	203	0,43...0,52...0,66	0,48...0,59...0,75
Linde	5	165	0,41...0,54...0,63	0,32...0,49...0,56
Spitzahorn	4	168	0,50...0,59...0,69	0,52...0,62...0,77
Hainbuche	3	94	0,61...0,74...0,84	0,50...0,79...0,82

Wie aus der Regressionsanalyse (Abb. 16) ersichtlich ist, besteht sowohl für die leichten (z.B. Pappel) als auch für die schweren (z.B. Hainbuche) Holzarten eine signifikante, straffe Beziehung ($r = 0,86$) zwischen den Höhenwerten der Härtediagramme (h [cm]) und den entsprechenden Rohdichten (ρ , [g/cm³]). Somit ist die Abriebfestigkeit des Holzes unter dem Sandstrahl, ähnlich wie die Brinellhärte (A. YLINEN 1943), direkt proportional zu seiner Rohdichte.

Mit Ausnahme der marknahen Bereiche konnte trotz unterschiedlicher Probenausformung und -behandlung eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Rohdichteverlauf und Härtediagrammen von Querschnittprofilen und ihren zugehörigen Dreieckproben festgestellt werden. Dies zeigt Abbildung 17 am Beispiel einer Lindenprobe, wobei das Härtediagramm des Querschnittprofils mit dem Laser-Abstandssensor ermittelt wurde. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die von H. SCHULZ (1982) und H. GRUNVOGEL (1986) schon bewiesen wurde, wird hierdurch erneut bekräftigt.

Im marknahen Bereich der Dreieckproben wird aber der Härteverlauf durch die starke Krümmung der Jahrringe verfälscht: Die harten Spätholzschnitten verhindern durch Schattenwirkung einen weiteren Abrieb der unter bzw. hinter ihnen liegenden weicherer Holzschichten. Deshalb wurden die marknahen Jahrringe der Dreieckproben bei der Erfassung des Härteverlaufes nicht berücksichtigt.

Vergleicht man Härtediagramme mit ihren zugehörigen Mikroquerschnitten (Abb. 17 b u. 18), läßt sich der Verlauf der Abriekurve durch den anatomischen Jahrringaufbau interpretieren. Generell gilt, daß ein niedriger Zellwand-Flächenanteil einen starken Abrieb bewirkt, während dichtes Gewebe als Härtewelle oder -band im Härteprofil erhalten bleibt.

Mit Hilfe der Sandstrahlmethode und anschließender Analyse von Querschnittprofilen oder Dreieckproben ist folglich eine Einschätzung des Rohdichteverlaufes und somit des Jahrringaufbaues in beliebigen Jahrringen und Jahrringfolgen möglich.

Die Welligkeit des Radialprofils spiegelt, wie an einzelnen Proben festgestellt wurde, den Verlauf der Abriebkurve des entsprechenden Querschnittprofils wider. Die für den marknahen Bereich der Dreieckproben gemachten Einschränkungen gelten allerdings auch für das Radialprofil. Ferner können die auf dem Radialschnitt liegenden Holzstrahlen, vor allem die besonders hohen Holzstrahlen der Buche und Eiche, die Beschaffenheit des Härteprofils beeinträchtigen. Deshalb wurde auf eine Auswertung der Welligkeit von Radialprofilen verzichtet.

3.1.1 Zerstreutporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

Zur Gruppe der zerstreutporigen Laubholzarten gehören Hölzer, deren Gefäße über den ganzen Jahrring zerstreut verteilt sind. Der Gefäßdurchmesser bleibt dabei annähernd gleich. Sie gelten als wenig strukturierte Holzarten, in denen die Jahrringgrenzen nicht deutlich markiert sind. Deshalb wird allgemein unterstellt, daß auch der Härteverlauf im Jahrring der zerstreutporigen Hölzer wenig differenziert ist.

3.1.1.1 Welligkeit und Jahrringaufbau

Der Umfang der untersuchten Baumstämme zur Ermittlung des Jahrringaufbaues anhand von Querschnittprofilen und Dreieckproben ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tab. 6: Umfang der untersuchten Baumstämme zur Ermittlung des zerstreutporigen Jahrringaufbaues.

UNTERSUCHTE HOLZARTEN	Querschnitt- profile	Dreieck- proben
Ahorn	13	13
Birke	6	5
Buche	2	2
Erle	6	8
Hainbuche	2	2
Gemeine Hasel	2	2
Linde	5	5
Pappel	8	7
Roßkastanie	2	2
Weide	2	2

3.1.1.1.1 Intraannueller Härteverlauf im adulten Holz

Innerhalb der untersuchten zerstreutporigen Hölzer (Tab. 6) wurden zwei charakteristische Grundformen des groben Härteverlaufes im Jahrring unterschieden:

Grundtyp 1: Pappel-Typ

Insbesondere bei Erle, Gemeiner Hasel, Linde, Pappel und Weide, die als weiche Hölzer gelten, aber auch bei Buche ist der Härteunterschied zwischen Früh- und Spätholz in der Regel stark ausgeprägt (Abb. 19). Im allgemeinen nimmt die Härte vom Früh- zum Spätholz in breiten Jahrringen allmählich, in engeren Jahrringen rasch zu. Dadurch sind die einzelnen Jahrringe im Härteprofil meist deutlich zu erkennen.

Wie Abbildung 17 b zeigt, zeichnet sich das Frühholz durch eine hohe Gefäßhäufigkeit aus. Im Übergangsholz nehmen Gefäßanteil und -durchmesser allmählich in Richtung des Spätholzes ab, das schließlich als gefäßarmes, dichtes Gewebe erscheint. Dadurch sind die Jahrringe deutlich voneinander abgesetzt.

Eine derartige Gefäßanordnung wird ebenfalls für Buche, Linde, Pappel und Weide beschrieben (D. GROSSER 1977; R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985).

Grundtyp 2: Birke-Typ

Härtere Hölzer, wie Ahorn, Birke und Hainbuche, aber auch Roßkastanie zeigen dagegen im adulten Holz einen wenig differenzierten Härteverlauf (Abb. 20), wobei zwischen Früh- und Spätholz keine oder nur geringe Härteunterschiede bestehen. Daher ist die Identifizierung der Jahrringgrenzen im Härteprofil dieser Holzarten, besonders innerhalb von Jahrringfolgen, die aus engen Jahrringen bestehen, sehr schwierig.

Der gleichmäßige Härteverlauf läßt sich wiederum durch den anatomischen Jahrringaufbau begründen. Bei diesen Holzarten ist die Gefäßanordnung als zerstreutporig im engeren Sinn zu bezeichnen, d. h. zwischen Früh- und Spätholz besteht kaum ein Unterschied in der Gefäßhäufigkeit bzw. -größe (Abb. 21). Die einzelnen Jahrringe

werden lediglich durch wenige Reihen abgeflachter, dickwandiger Libriformfasern und terminaler Längsparenchymzellen abgeschlossen. Ein derartiger Jahrringaufbau wird in der Literatur (z.B. D. GROSSER 1977; R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985) für Ahorn, Birke und Roßkastanie angegeben.

3.1.1.1.2 Intraannueller Härteverlauf im jugendlichen Holz

In allen untersuchten zerstreutporigen Holzarten scheint der marknahe Holzbereich im Querschnittprofil insgesamt tiefer erodiert zu sein, so daß die Härte von Jahrring zu Jahrring mit wachsender Entfernung vom Mark allmählich zunimmt. K. FUKAZAWA (1984) beobachtete ähnliche Tendenzen hinsichtlich der Rohdichte und des Zellwandanteils im jugendlichen Holz von Birken (*Betula maximo-wicziana* Reg. und *Betula ermaninii* Cham.) und Linde (*Tilia japonica* Sim.).

Die marknahen Jahrringe weisen sowohl bei den Holzarten vom Grundtyp Pappel als auch bei denjenigen vom Grundtyp Birke einen starken Abrieb der Frühholzzone auf, wobei die Härte zum Äußersten Spätholz hin deutlich zunimmt. Folglich lassen sich marknahe Jahrringe in dem sonst wenig differenzierten Querschnittprofil vom Grundtyp Birke leicht identifizieren. Eine sichere Abgrenzung zwischen jugendlichem und adultem Holz bleibt allerdings schwierig, da der Übergang von einem Bereich zu dem anderen fließend erfolgt.

Die mikroskopische Untersuchung der zugehörigen Mikroquerschnitte ergab, daß die Jahrringe des jugendlichen Holzes zunächst durch eine Gefäßanhäufung im ersten Frühholzbereich gekennzeichnet sind. In Richtung des Spätholzes nimmt dann der Gefäßflächenanteil rasch ab. Dieser halbringporig-ähnliche Jahrringaufbau gilt z.B. bei den untersuchten Birkenproben ausnahmslos für die ersten 4 bis 7 marknächsten Jahrringe.

3.1.1.1.3 Reaktionsholz

In Querschnittprofilen und Dreieckproben zeichnen sich vor allem bei Hainbuche und Ahorn, aber auch bei Pappel und Weide, manche Jahrringe durch einen außergewöhnlichen Härteverlauf aus: Vom ersten Frühholz an ist die Härte relativ hoch, während sie in Richtung Spätholz allmählich abklingt (Abb. 22).

Durch mikroskopische Untersuchungen von zugehörigen Mikroquerschnitten konnte bewiesen werden, daß dieser Härteverlauf Jahrringe mit intensiver Zugholzbildung kennzeichnet (Abb. 22). Bekanntlich bilden Zugholzfasern eine in der Regel relativ breite, ligninfreie Tertiärwandschicht, die als "gelatinöse Schicht" oder "G-Schicht" bezeichnet wird (H. SACHSSE 1965). Nach Doppelfärbung der Mikroquerschnitte mit Safranin und Astrablau lassen sich Zugholzfasern durch die blau angefärbte G-Schicht deutlich unterscheiden (H. v. AUFSESS 1973).

Der höhere Abriebwiderstand zugholzhaltigen Gewebes ist auf den höheren Zellwandanteil in den betroffenen Zonen zurückzuführen. Während der Zellwandanteil durch die G-Schicht-Bildung stark erhöht wird, scheint intensive Zugholzbildung auch mit einer geringeren Gefäßhäufigkeit verbunden zu sein (V. NEČESANÝ u. J. CETLOVÁ 1969). Dies führt insgesamt zu einer höheren Rohdichte der Zugholzzonen (G. JAYME 1951; W. KLAUDITZ u. I. STOLLEY 1955; H. SACHSSE 1965). Der charakteristische Härteabfall im Bereich des Spätholzes zugholzhaltiger Jahrringe läßt sich dadurch erklären, daß die Endzonen des Jahrringes in der Regel zugholzfrei bleiben (A. BONNEMANN 1975).

Zugholzbildung kann aber je nach Holzart eine verschiedenartige Oberflächenbeschaffenheit des Querschnittprofils bewirken. So zeichnen sich kompakte Zugholzzonen im Querschnittprofil der Pappel und Weide durch leicht erhöhte, abgeflachte Härtewellen aus, deren Oberfläche grob strukturiert und stark verfilzt erscheint (Abb. 23). Bei Ahorn und Hainbuche dagegen bilden sich wenig strukturierte, kompakte, stark ausgeprägte Härtewellen (Abb. 24).

Nach den umfangreichen Untersuchungen von H.-R. HÖSTER u. W. LIESE (1966) über das Vorkommen von Reaktionsgewebe in Wurzeln und Ästen der Dikotyledonen ist bekannt, daß die Linde zu den wenigen Holzarten gehört, die kein Zugholz bilden.

Stellenweise wurden im Querschnittprofil der Linde ganze Jahrringe gefunden, die im Härteprofil, wie H. SCHULZ (1985) auch beobachtete, auffallend tief eingesunken erscheinen. An Lindenästen wurde ferner festgestellt, daß derartige, nach Sandstrahlbehandlung besonders tief abgeriebene, breite Jahrringe erstaunlicherweise an dem Aufbau der Zugseite (Ast-Oberseite) stark beteiligt sind (Abb. 25).

Mikroskopische Untersuchungen an Mikroquerschnitten der im Härteprofil "eingesunkenen" Jahrringe der Linde ergaben, daß das Grundgewebe dieser Jahrringe besonders dünnwandig und weitleumig ist (Abb. 26), während die Lignifizierung der Zellwände zurückgeblieben ist (blaue Färbung der Zellwände nach Doppelfärbung mit Safranin und Astrablau). Dies erklärt die besonders geringe Abriebfestigkeit dieser Jahrringe. Da derartige Jahrringe aber vor allem auf der Zugseite von Ästen zu finden sind, liegt die Vermutung nahe, daß dieser anatomische Aufbau möglicherweise als eine Art der Reaktionsholzbildung bei Linde zu betrachten ist. Die Funktion oder Funktionsweise dieses weichen und dünnwandigen Gewebes bedarf der Klärung.

3.1.1.1.4 Intraannuelle Dichteschwankungen

Der vorstehend beschriebene, allgemeine Härteverlauf wird in vielen Jahrringen durch Härtewellen bzw. -bänder gestört. Diese sind stellenweise, wie z.B. bei Erle, so stark ausgeprägt (Abb. 18), daß die Identifizierung mancher Jahrringe im Härteprofil sehr erschwert wird.

Dichteunregelmäßigkeiten im allgemeinen Dichteanstieg vom Frühholz zum Spätholz wurden von F.H. SCHWEINGRUBER (1980) an Nadelhölzern intensiv untersucht und als intraannuelle Dichteschwankungen bezeichnet (F.H. SCHWEINGRUBER 1983).

Die Härtewellen und -bänder stellen im Härteprofil tangentielle, innerhalb des Jahrringes zonenweise auftretende Verdichtungen des Holzgewebes dar, die durch Schwankungen des Gefäß- bzw. Zellwandflächenanteils verursacht werden. Härtewellen zeichnen sich in den entsprechenden Mikroquerschnitten in dunkler erscheinenden Zonen aus, während Härtebänder gefäßarmen Streifen entsprechen (Abb. 27).

Dies wird im makroskopischen Bereich ebenfalls deutlich, wenn man mit dem Mikrotom angeschnittene, glatte Probenquerschnitte mit Kreidepulver anreibt (F.H. SCHWEINGRUBER 1983). Dadurch treten nicht nur die mit Kreidepulver verstopften Gefäße hervor, sondern auch die innerhalb des Jahrringes auftretenden Verdichtungs- bzw. Auflockerungszonen, die als Härtewellen und -bänder bzw. Gräben im Querschnittprofil erscheinen (Abb. 28).

In mehreren Proben der Birke, Erle und Pappel wurde ferner festgestellt, daß manche Verdichtungen des Holzgewebes, die zur Bildung von Härtewellen und -bändern führen, auch in Verbindung mit gehäuftem Vorkommen von Markflecken entstehen können. Markflecken bestehen aus Parenchymzellen, die Inhaltsstoffe enthalten. Sie werden infolge von kleinflächigen Verletzungen des Kambiums gebildet, die durch Larven der Minierfliege (Agromyziden) beim Anlegen ihrer Fraßgänge im Kambiumbereich verursacht werden (H. SUSS 1982).

Darüber hinaus wurden in Querschnittprofilen der Birke und Pappel jahrringgrenzen-ähnliche Härtewellen beobachtet, die bei größeren Verletzungen des Kambiums innerhalb der Vegetationsperiode beidseitig des Überwallungswulstes entstehen. Sie können sich in tangentialer Richtung über den ganzen Umfang des betroffenen Jahrringes, aber auch in axialer Richtung über mehrere Meter unterhalb und oberhalb der Verletzung fortsetzen.

Härtewellen können ebenso auf Reaktionsholzbildung zurückgeführt werden, die bisweilen zonenweise innerhalb des Jahrringes auftreten kann (H. MAYER-WEGELIN 1957; A. BONNEMANN 1975). Jahrringzonen mit intensiver Zugholzbildung erscheinen dann im Querschnittprofil

als stark ausgeprägte, je nach Holzart unterschiedlich strukturierte Härtewellen (vgl. Abb. 23 u. 24).

Das Vorkommen von intraannuellen Dichteschwankungen in Abhängigkeit der Jahrringbreite, der Entfernung vom Mark, der Himmelsrichtung und der Höhe im Stamm wurde an verschiedenen Bäumen systematisch untersucht. An Querschnittprofilen von Stammscheiben aus verschiedenen Ahorn-, Birken-, Erlen- und Pappelstämmen wurde die Anzahl der intraannuellen Dichteschwankungen, d.h. die Anzahl der Härtewellen und -bänder pro Jahrring, an insgesamt 2906 Stellen ermittelt (Tab. 7). Die im letzten Spätholz liegende Härtewelle, die häufig einen Jahrring vor dem Frühholz-Graben des nächsten Jahrringes abschließt, wurde hierbei nicht berücksichtigt. Auch Härtewellen, die eindeutig auf Zugholzbildung zurückzuführen waren, wurden nicht mitgezählt.

Durch Regressionsanalysen wurde versucht, den Einfluß der Jahrringbreite, der Entfernung vom Mark, der Himmelsrichtung und der Höhe im Stamm auf das Vorkommen von Dichteschwankungen zu prüfen.

Einfluß der Jahrringbreite

Es wurden bis 10 Dichteschwankungen pro Jahrring (Erle 6/2) gezählt. Während die Erlenproben besonders viele Dichteschwankungen (durchschnittlich bis 5,4 pro Jahrring im Baum 6/1) aufweisen, wurden bei Ahorn und Birke kleinste Mittelwerte von 0,6 (Baum 8/16) bzw. 0,5 (Baum 7/4) Dichteschwankungen pro Jahrring ermittelt (Tab. 7).

Wie aus Tabelle 7 ersichtlich ist, besteht, abgesehen von wenigen Proben, eine gesicherte Beziehung zwischen der Anzahl von Dichteschwankungen pro Jahrring und der Jahrringbreite. Dies gilt sowohl für breitringige als auch für engringige Stammscheiben, wobei die für Erle 6/1 und 6/2 (jeweils 6 Jahrringe in 2 Richtungen) ermittelte schwache Beziehung wahrscheinlich auf den hohen Anteil an marknahen Jahrringen (jugendlichem Holz) zurückzuführen ist.

Tab. 7: Häufigkeit von intraannuellen Hätewellen und -bändern (Dichteschwan-
kungen) in Abhängigkeit von der Jahrringbreite (JR: Jahrring, n: Anzahl
der erfaßten Jahrringe, d: durchschnittliche Anzahl von Hätewellen und
-bändern pro Jahrring, b: durchschnittliche Jahrringbreite [mm],
s: Standardabweichung).

HOLZ- ARTEN	Baum- Nr.	JR	DICHTESCHW.		JR-BREITE		REGRESSIONS- GLEICHUNG d =	BESTIMMTHEITS- MASS
			d	s	b	s		
PAPPEL	1/ 1 ²⁾	62	1,0	1,1	2,99	2,37	-0,1+0,37.b	0,61 ***
	1/ 4 ²⁾	48	1,7	1,6	3,37	2,36	-0,3+0,58.b	0,70 ***
	1/ 5 ³⁾	908	2,3	1,2	5,60	2,50	0,6+0,30.b	0,36 ***
	2/ 1 ²⁾	44	0,6	1,0	1,64	1,52	-0,1+0,47.b	0,52 ***
	2/ 2 ²⁾	48	1,2	1,3	2,68	1,98	-0,2+0,51.b	0,65 ***
	2/ 3 ²⁾	44	1,6	1,6	2,83	2,23	0,57.b	0,65 ***
	2/ 4 ²⁾	52	1,6	1,5	3,14	1,81	0,52.b	0,42 ***
	2/ 5 ⁴⁾	848	0,9	1,2	2,85	1,26	-0,1+0,38.b	0,16 ***
ERLE	6/ 1 ²⁾	12	5,4	0,9	7,86	2,19	4,5+0,12.b	0,08 -
	6/ 2 ²⁾	12	4,5	2,5	7,68	1,66	-1,4+0,77.b	0,26 -
	6/ 3 ²⁾	26	3,0	1,0	4,49	0,93	-0,2+0,71.b	0,46 ***
	6/ 4 ²⁾	40	2,1	2,0	3,01	1,81	-0,2+0,78.b	0,52 ***
	6/ 6 ²⁾	48	2,1	2,4	2,59	2,05	-0,4+0,98.b	0,73 ***
BIRKE	7/ 1 ²⁾	44	1,1	1,2	2,84	1,52	-0,4+0,54.b	0,48 ***
	7/ 2 ²⁾	52	0,9	1,0	2,53	1,57	0,33.b	0,29 ***
	7/ 3 ²⁾	60	1,0	1,0	2,85	1,55	0,35.b	0,30 ***
	7/ 4 ³⁾	74	0,5	1,1	1,81	1,82	-0,4+0,52.b	0,70 ***
	7/ 6 ⁵⁾	236	1,4	1,1	2,92	1,44	-0,3+0,37.b	0,24 ***
AHORN	8/ 6 ²⁾	26	1,8	1,4	5,41	3,14	0,5+0,25.b	0,31 **
	8/ 7 ²⁾	52	1,3	1,2	2,65	1,40	0,2+0,40.b	0,22 ***
	8/ 8 ²⁾	52	0,9	1,1	3,01	1,43	-0,5+0,47.b	0,41 ***
	8/14 ¹⁾	31	1,4	1,3	4,26	3,41	0,2+0,27.b	0,52 ***
	8/16 ¹⁾	87	0,6	0,7	2,40	1,59	0,2+0,18.b	0,15 ***

1): eine Stammscheibe in einer Richtung

2): eine Stammscheibe in 2 Richtungen

3): 11 Stammscheiben in 4 Richtungen

4): 8 Stammscheiben in 4 Richtungen

5): 4 Stammscheiben in 2 Richtungen

***: signifikant auf 0,1%-Niveau

** : signifikant auf 1%-Niveau

* : signifikant auf 5%-Niveau

- : nicht signifikant

Einfluß der Entfernung vom Mark

An mehreren Proben wurde festgestellt, daß die marknahen Jahrringe besonders viele Härtewellen und -bänder aufweisen. Deshalb wurde die Häufigkeit der Dichteschwankungen innerhalb der 5 marknächsten Jahrringe, d.h. im Bereich des jugendlichen Holzes, getrennt ermittelt. Durch Quotientenbildung zwischen den Mittelwerten "Anzahl der Dichteschwankungen" (d) und "Jahrringbreite" (b) wurde eine Vergleichbarkeit der Werte ohne Einfluß der Jahrringbreite ermöglicht. So wurde die relative Häufigkeit von Dichteschwankungen (rd) bezogen auf einen Radius von 1 cm errechnet:

$$rd = \frac{d}{0,1 \cdot b} \quad [cm^{-1}].$$

In Tabelle 8 sind die rd-Werte des jugendlichen Holzes denen der gesamten Jahrringe gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß die relative Häufigkeit von Dichteschwankungen im Durchschnitt für die gesamten Jahrringe der untersuchten Stammscheiben zwischen 2,5 und 8,1 Dichteschwankungen/cm liegt, während für die jugendlichen Jahrringe Werte von 3,5 bis 11,6 ermittelt wurden. Von wenigen Ausnahmen abgesehen ist die relative Häufigkeit von Dichteschwankungen in den jugendlichen Jahrringen stets höher. Umgekehrte Verhältnisse zeigen sich aber bei Erle 6/1, 6/2 und 6/3, deren Stammscheiben insgesamt nur wenige Jahrringe zählen, und deshalb einen verhältnismäßig höheren Anteil an jugendlichem Holz aufweisen.

Tab. 8: Häufigkeit von intraannuellen Härtezellen und -bändern (Dichteschwankungen) im jugendlichen Holz (n: Anzahl der erfaßten Jahrringe, d: durchschnittliche Anzahl von Härtezellen und -bändern pro Jahrring, b: durchschnittliche Jahrringbreite [mm], rd: relative Häufigkeit von Dichteschwankungen = $d/0,1 \cdot b$ [d/cm]).

HOLZ-ARTEN	Baum-Nr.	GESAMT				JUGENDLICHES HOLZ			
		n	d	b	rd	n	d	b	rd
PAPPEL	1/ 1 ²⁾	62	1,0	2,99	3,3	10	2,6	5,69	4,6
	1/ 4 ²⁾	48	1,7	3,37	5,0	10	2,2	5,24	4,2
	1/ 5 ³⁾	908	2,3	5,60	4,1	220	2,5	5,29	4,7
	2/ 1 ²⁾	44	0,6	1,64	3,7	10	2,0	3,76	5,3
	2/ 2 ²⁾	48	1,2	2,68	4,5	10	3,0	5,15	5,8
	2/ 3 ²⁾	44	1,6	2,83	5,7	10	3,2	4,51	7,1
	2/ 4 ²⁾	52	1,6	3,14	5,1	10	2,8	5,41	5,2
	2/ 5 ⁴⁾	848	0,9	2,85	3,2	160	2,4	2,79	8,6
ERLE	6/ 1 ²⁾	12	5,4	7,86	6,9	10	5,6	8,41	6,7
	6/ 2 ²⁾	12	4,5	7,68	5,9	10	4,5	8,04	5,6
	6/ 3 ²⁾	36	3,0	4,49	6,7	10	2,8	4,25	6,6
	6/ 4 ²⁾	40	2,1	3,01	7,0	10	4,2	4,00	10,5
	6/ 6 ²⁾	48	2,1	2,59	8,1	10	4,8	4,15	11,6
BIRKE	7/ 1 ²⁾	44	1,1	2,84	3,9	10	2,7	4,58	5,9
	7/ 2 ²⁾	52	0,8	2,53	3,2	10	2,1	4,14	5,1
	7/ 3 ²⁾	60	1,0	2,85	3,5	10	2,1	4,45	4,7
	7/ 4 ¹⁾	74	0,5	1,81	2,8	5	4,0	6,07	6,6
	7/ 6 ⁵⁾	236	1,4	2,92	4,9	40	2,3	3,53	6,5
AHORN	8/ 6 ²⁾	26	1,8	5,41	3,3	10	2,8	7,99	3,5
	8/ 7 ²⁾	52	1,3	2,65	4,9	10	2,8	3,67	7,6
	8/ 8 ²⁾	52	0,9	3,01	3,0	10	1,6	4,29	3,7
	8/14 ¹⁾	31	1,4	4,26	3,3	5	2,6	3,69	7,0
	8/16 ¹⁾	87	0,6	2,40	2,5	5	0,8	1,26	6,3

1): eine Stammscheibe in einer Richtung

2): eine Stammscheibe in 2 Richtungen

3): 11 Stammscheiben in 4 Richtungen

4): 8 Stammscheiben in 4 Richtungen

5): 4 Stammscheiben in 2 Richtungen

Einfluß der Himmelsrichtung und der Höhe im Stamm

Die an 2 Pappelstämmen (Aspe und Schwarzpappel-Hybrid: Tab. 1) durchgeführten Messungen ergaben, daß sich die Mittelwerte der relativen Häufigkeit der Dichteschwankungen (rd) zwischen den 4 Himmelsrichtungen nur geringfügig unterscheiden.

Abbildung 29a zeigt die Veränderungen der Jahrringbreite und der Häufigkeit der Dichteschwankungen mit zunehmender Höhe im Stamm des Schwarzpappel-Hybriden. Der Verlauf der Jahrringbreite weist ein Maximum am Stammfuß und eine allmähliche Abnahme in Richtung des Gipfels auf. Dies entspricht der für freiständig erwachsene Bäume charakteristischen Veränderung der Jahrringbreite mit der Höhe im Stamm (W. KNIGGE u. H. SCHULZ 1966). Die absolute Häufigkeit der Dichteschwankungen (d) bleibt über alle Höhen relativ konstant. Dagegen zeigt die relative Häufigkeit (rd) sowohl für die gesamten als auch für die jugendlichen Jahrringe (5 mark-nächsten Jahrringe) eine starke Zunahme im Kronenbereich mit einem Maximum am Gipfel und einem kleineren Maximum im unteren Kronenbereich (9 m).

Bei der Aspe (Abb. 29b) sind die Veränderungen der Jahrringbreite mit zunehmender Höhe im Stamm geringfügig. Es zeichnet sich lediglich ein schwach ausgeprägtes Maximum in einer Höhe von 12 m ab. Die absolute Häufigkeit der Dichteschwankungen (d) bleibt über alle Höhen gering und relativ konstant, während die relative Häufigkeit (rd) für die gesamten Jahrringe mit steigender Höhe allmählich zunimmt. Die relative Häufigkeit in den jugendlichen Jahrringen zeigt im Vergleich deutlich höhere Werte und unabhängig von der Höhe stark ausgeprägte Schwankungen.

3.1.1.1.5 Lage der Jahrringgrenze im Jahrring-Härteprofil

Wie H. SCHULZ (1985) andeutete, schließt die Jahrringgrenze im Härteprofil nicht immer eine harte Schicht ab. Vor allem in Holzarten vom Grundtyp Birke, aber auch im Härteverlauf vom Grundtyp Pappel erschwert das Vorkommen von intraannuellen Dichteschwankungen und Zugholzzonen die Identifizierung der Jahrringe im Härteprofil.

An Querschnittprofilen und Dreieckproben aus verschiedenen Pappel- und Erlenstämmen (Grundtyp Pappel) sowie Ahorn- und Birkenstämmen (Grundtyp Birke) wurde die Lage der Jahrringgrenze in insgesamt 2894 Jahrringprofilen systematisch erfaßt (Tab. 9). Zur sicheren Identifizierung der Jahrringgrenzen wurden gegebenenfalls die zugehörigen Mikroquerschnitte herangezogen.

Wie in Abbildung 30 schematisch dargestellt wird, kann die Jahrringgrenze in einem Graben (C), auf dessen Rändern (A, B, E) oder auch inmitten des über zwei aufeinanderfolgende Jahrringe gleichbleibenden Härteverlaufes (D) liegen.

Es zeigte sich, daß bei Erle (5 Stämme) in 27 % und bei Pappel (8 Stämme) in 13 % der erfaßten Jahrringe die Jahrringgrenze nicht durch einen senkrechten Härteabfall markiert wird (Tab. 9).

Bei Erle läßt sich der im Vergleich zu Pappel relativ hohe Anteil an nicht deutlich markierten Jahrringen durch das häufige Vorkommen von stark ausgeprägten, jahrringgrenzen-ähnlichen Härtewellen erklären, die inmitten von Jahrringen aber auch vor der Jahrringgrenze im letzten Spätholz verlaufen können. Bei Pappel dagegen wird der ungewöhnliche Härteverlauf an der Jahrringgrenze in erster Linie durch zugholzhaltige Jahrringe bedingt.

Tab. 9: Lage der Jahrringgrenze im Jahrring-Härteprofil.

HOLZARTEN	Baum-Nr.	Untersuchte Jahrringe	Härteverlauf an der JR.-Grenze [%]				
							
PAPPEL	1/ 1 ²⁾	59	85	11	-	2	2
	1/ 4 ²⁾	48	86	8	-	6	-
	1/ 5 ³⁾	908	88	8	1	2	1
	2/ 1 ²⁾	40	93	5	-	-	2
	2/ 2 ²⁾	48	65	29	2	2	2
	2/ 3 ²⁾	46	83	11	2	2	2
	2/ 4 ²⁾	52	79	15	2	4	-
	2/ 5 ⁴⁾	848	88	8	-	3	1
	gesamt	2049	87	9	1	2	1
ERLE	6/ 1 ²⁾	12	100	-	-	-	-
	6/ 2 ²⁾	12	100	-	-	-	-
	6/ 3 ²⁾	36	69	19	-	-	12
	6/ 4 ²⁾	40	55	25	10	8	2
	6/ 6 ²⁾	48	75	13	12	-	-
	gesamt	138	73	15	7	2	3
BIRKE	7/ 1 ²⁾	44	16	32	2	41	9
	7/ 2 ²⁾	52	19	17	6	44	14
	7/ 3 ²⁾	60	27	3	2	40	28
	7/ 4 ¹⁾	74	41	5	-	51	3
	7/ 6 ⁵⁾	236	25	30	-	32	13
	gesamt	466	26	21	1	38	14
AHORN	8/ 6 ²⁾	24	50	16	13	13	8
	8/ 7 ²⁾	50	58	20	-	2	20
	8/ 8 ²⁾	50	50	42	-	4	4
	8/14 ¹⁾	30	93	-	-	-	7
	8/16 ¹⁾	87	84	8	-	7	1
	gesamt	241	70	17	1	5	7

1): jeweils eine Stammscheibe in einer Richtung

2): jeweils eine Stammscheibe in 2 Richtungen

3): 11 Stammscheiben in 4 Richtungen

4): 8 Stammscheiben in 4 Richtungen

5): 4 Stammscheiben in 2 Richtungen

=: Jahrringgrenze

⦿: Spätholz

Überraschend stellte sich bei Birke (5 Stämme) heraus, daß in 74 % der erfaßten Jahrringe die Jahrringgrenze nicht im Anschluß an die härteste Schicht liegt, sondern, wie H. SCHULZ (1985) bereits feststellte, "... auf, hinter oder sogar vor ... einer harten Schicht ..." (Tab. 9, Abb. 30). In vielen Jahrringen (38 %) geht das Spätholz in das nachfolgende Frühholz fließend über, so daß kein Härteunterschied zwischen benachbarten Jahrringen besteht. Dadurch erweist sich die Identifizierung der Jahrringe im Härteprofil von Birkenholz generell als besonders schwierig.

Im Gegensatz zur Pappel konnte in den untersuchten Mikroquerschnitten der Birke kein Reaktionsgewebe nachgewiesen werden, das den hohen Anteil an nicht deutlich markierten Jahrringen hätte erklären können.

Die unerwartete Lage der Jahrringgrenzen im Härteprofil von Birkenholz wurde ausschließlich im Bereich des adulten Holzes festgestellt. Im marknahen Bereich (jugendlichem Holz) dagegen, d. h. in den 4 bis 7 marknächsten Jahrringen aller untersuchten Birkenproben, liegt die Jahrringgrenze ausnahmslos im Anschluß an die härteste Schicht (Abb. 30: A). Demzufolge läßt sich bei Birke der Bereich des jugendlichen Holzes deutlicher abgrenzen als bei den anderen untersuchten Holzarten.

Bei Ahorn (5 Stämme), der wie Birke durch einen gleichmäßigen Härteverlauf gekennzeichnet ist, liegen die Jahrringgrenzen in 30 % aller Jahrringe nicht im Anschluß an die härteste Schicht (Tab. 9). In 50 % dieser Jahrringe konnte aber Zugholz nachgewiesen werden, so daß die Jahrringe im Härteprofil des Ahorns insgesamt leichter zu identifizieren sind als bei Birke.

3.1.1.1.6 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Untersuchung von Querschnittprofilen und Dreieckproben verschiedener zerstreutporiger Hölzer hat gezeigt, daß ihr Jahrring-aufbau im allgemeinen viel differenzierter und komplexer ist als bisher beschrieben.

Im Bereich des adulten Holzes konnten zwei verschiedene Grundtypen des Härteverlaufes im Jahrring unterschieden werden. Beim Grundtyp Pappel (Buche, Erle, Gemeine Hasel, Linde, Pappel und Weide) sind die Jahrringe in der Regel durch einen Härteabfall zwischen Spät- und Frühholz aufeinanderfolgender Jahrringe deutlich abgesetzt. Beim Grundtyp Birke (Ahorn, Birke, Hainbuche und Roßkastanie) ist der Härteverlauf dagegen gleichmäßiger und weniger stark zwischen Früh- und Spätholz differenziert.

Die marknahen Jahrringe zeichnen sich durch einen halbringporigen Aufbau aus. Bei Birke läßt sich dadurch jugendliches Holz vom adulten Holz deutlich abgrenzen.

Mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens konnte ferner intensive Reaktionsholzbildung auf einfache Weise makroskopisch nachgewiesen werden. Auf eine bisher unbekannte, mögliche Form der Reaktionsholzbildung bei Linde wurde mit dieser Methode aufmerksam gemacht.

Die untersuchten zerstreutporigen Laubhölzer weisen überraschend viele intraannuelle Dichteschwankungen auf. In breiten Jahrringen finden sich mehr Dichteschwankungen als in engeren. Unabhängig von der Jahrringbreite zeichnen sich marknahe Jahrringe durch eine höhere Anzahl von Dichteschwankungen aus. Außerdem nimmt, wie am Beispiel von 2 Pappelstämmen gezeigt wurde, die relative Häufigkeit der Dichteschwankungen mit steigender Höhe im Stamm leicht zu.

Nach systematischer Erfassung der Lage der Jahrringgrenze im Härteprofil ergab sich, daß sich die Jahrringgrenze vor allem im adulten Bereich der Holzarten vom Grundtyp Birke nicht immer an die härteste Holzschicht im Jahrring anschließt. Besonders bei Birke sind die Jahrringe des adulten Holzes im wenig differenzierten Härteprofil schwer zu identifizieren.

3.1.1.2 Artspezifische Härteprofile

3.1.1.2.1 Beschreibung und Interpretation der Härteprofile

PAPPEL (*Populus spp.*)

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Der sandbestrahlte Querschnitt zeigt bei allen untersuchten Proben aus 16 verschiedenen Bäumen einen überwiegend diagonal- vernetzten Härteraster, der von schräg zur Jahrringgrenze verlaufenden Härterippen gebildet wird (Abb. 31).

Die Härterippen weisen eine Breite von etwa 100 μm (Frühholz) bis 200 μm (Spätholz) auf und treffen in einem Winkel von 50 bis 90° aufeinander. Im Frühholz ist der Raster feinmaschig, im Spätholz dagegen breitmaschiger. Dadurch erscheint die diagonale Struktur im Spätholz deutlicher als im Frühholz (Abb. 31).

Innerhalb der Jahrringe wird die Oberflächenstruktur außer dem beschriebenen diagonal- vernetzten Muster, vielfach durch intra-annuelle Dichteschwankungen geprägt (Abb. 27).

Es können zwei Typen von Dichteschwankungen unterschieden werden (vgl. 2.2.1.4, Abb. 12 u. 27):

- Härtebänder: Sie sind dünn (100 bis 200 μm), unterbrechen die diagonale Oberflächenstruktur und treten mauerartig hervor;
- Härtewellen: Sie sind unterschiedlich breit und durch einen allmählichen Anstieg und Abfall gekennzeichnet, ohne die diagonale Struktur zu unterbrechen. Häufig zeichnen sich Härtewellen durch einen Wechsel von einem feinen zu einem gröberen Diagonalraster oder umgekehrt aus.

Nach A. BONNEMANN (1975) sind die Jahrringgrenzen im Pappelholz mit bloßem Auge schwer zu erkennen. Nach Sandstrahlbehandlung aber werden sie im Querschnittprofil meistens durch das stark abgeriebene erste Frühholz im Vergleich zu den harten Schichten des letzten Spätholzes deutlich abgesetzt (Härteverlauf vom Grundtyp Pappel: vgl. 3.1.1.1.1). Einige Jahrringgrenzen liegen aber mitten in einer tangential verlaufenden, in das Frühholz des folgenden Jahrringes übergreifenden Härtewelle. In seltenen Fällen deutet sich auch eine Jahrringgrenze nur durch eine schwache, schmale Rinne im Bereich des ersten Frühholzes an, ohne daß Struktur- und Härteunterschiede zwischen letztem Spätholz und erstem Frühholz aufeinanderfolgender Jahrringe erkennbar sind (Abb. 32).

Die Holzstrahlen werden im Querschnittprofil weder durch Erhöhung noch durch Absenkung deutlich, da sie aufgrund ihrer geringen Breite (einreihig) vom Sandstrahl nicht ausreichend selektiv erfaßt werden.

Der marknahe Bereich (4 bis 6 Jahrringe) zeichnet sich durch einen besonders starken Abrieb der Frühholzzonen aus (vgl. 3.1.1.1.2). Er zeigt außerdem eine feine diagonal- vernetzte Struktur, die, wie H. SCHULZ (1985) an Einzelproben der Aspe bereits feststellte, von zahlreichen Härtewellen durchzogen wird.

Untersuchungen an Querschnittprofilen aus Baumstämmen des Schwarzpappel-Hybriden und der Aspe (Universitätswald) ergaben, daß Härteraster aus dem Stammfußbereich gröber strukturiert sind als Härteraster aus höheren Stammbereichen (Abb. 33).

Interpretation des Querschnittprofils

Nach den vorstehend beschriebenen Beobachtungen an den sandbestrahlten Querschnitten fällt bei mikroskopischer Betrachtung von Mikroquerschnitten mit schwacher Vergrößerung auf, daß die Gefäße der Pappel eine bislang nicht erkannte diagonale Anordnung zeigen. Dies läßt sich im makroskopischen Bereich an mit Kreidepulver angeriebenen, glatten Probenquerschnitten nachvollziehen (Abb. 9).

Durch den unmittelbaren Vergleich zwischen Mikroquerschnitten und sandbestrahlten Querschnittoberflächen der gleichen Stelle konnte festgestellt werden, daß die diagonalen Härterippen dem Stützgewebe zwischen den diagonalen Gefäßreihen entsprechen. Der Sandstrahl bewirkt eine Erweiterung der Gefäße, die schließlich zur Bildung von durchgehenden, diagonalen Rinnen führt (Abb. 9).

Die auffallend feine Struktur des Härterasters in den marknahen Jahrringen ist auf die relativ hohe Gefäßdichte des jugendlichen Holzes (H.E. DESCH 1932) zurückzuführen.

Die gröber erscheinende Struktur im Härteraster des unteren Stammbereiches scheint durch die Größe und Anzahl der Gefäße bedingt zu sein. Durch vergleichende mikroskopische Untersuchungen an Mikroquerschnitten aus verschiedenen Stammhöhen konnte festgestellt werden, daß bei gleicher Entfernung vom Mark die Gefäße im Stammfußbereich insgesamt breiter und weniger zahlreich sind als in höher liegenden Stammbereichen. Ähnliche Ergebnisse erzielten M.H. ZIMMERMANN (1978) an verschiedenen Zerstreutporigen und H. SUSS u. W.R. MÜLLER-STOLL (1980) an einer Buche durch Ermittlung der Gefäßgröße und -anzahl in Abhängigkeit der Höhe im Stamm. Durch Sandstrahlbehandlung bilden sich somit zwischen den weit auseinander verlaufenden Gefäßreihen im Querschnittprofil des Stammfußes breitere Härterippen und Rinnen.

Betrachtet man unter dem Eindruck des durch Sandstrahlen gewonnenen Querschnittprofils die mikroanatomischen Strukturen des Pappelholzes, so wird deutlich, daß der Pappeljahrring nicht, wie oft beschrieben wird, gleichmäßig aufgebaut ist, sondern durch gefäßarme bzw. gefäßreiche Zonen geprägt ist. Die Wanddicke und die Breite der Fasern ändern sich ebenfalls häufig innerhalb des Jahrringes. Dadurch ergibt sich auf dem Querschnitt der Jahrringe ein bänderartiger Wechsel von helleren und dunkleren Zonen (V. NEČESANYÍ u. J. CETLOVÁ 1969), die den Härtezellen und -bändern des Querschnittprofils entsprechen (Abb. 27).

An Querschnittprofilen von einzelnen Stammscheiben des Schwarzpappel-Hybriden (Universitätswald) konnte ferner beobachtet werden, daß die Intensität der Zugholzbildung innerhalb gleicher Jahrringe in tangentialer Richtung durch zahlreiche Schwankungen gekennzeichnet ist. Im Querschnittprofil bilden sich über mehrere zugholzhaltige Jahrringe radialgerichtete Vertiefungen, d. h. weichere Radialstreifen, die zu den Borkenrissen hin verlaufen (Abb. 34). Mikroskopische Untersuchungen ergaben, daß die Radialstreifen keine Zugholzfasern enthalten. Dadurch werden Beobachtungen von A. BONNEMANN (1975) bestätigt, der zugholzfremde schmale Radialstreifen beschreibt, die in zugholzreichen Querschnittflächen der Pappel zu den Borkenrissen hin verlaufen.

Die vorstehende Beschreibung und Interpretation des Querschnittprofils gelten generell für alle untersuchten Pappelproben. An Querschnittprofilen aus 8 verschiedenen Aspen konnte aber festgestellt werden, daß sich Aspe durch eine weniger deutlich ausgebildete Diagonalstruktur auszeichnet. Die diagonalen Härterippen bilden hier vielmehr einen verflochtenen Härteraster (Abb. 35). Dadurch war unter dem vorhandenen Probenmaterial aus Pappelholz eine sichere Identifizierung der Aspenproben gewährleistet.

Anatomische Untersuchungen von Aspen-Mikroquerschnitten ergaben jedoch keine Unterschiede im Vergleich zu anderen Pappelarten, die diese Abweichung im Querschnittprofil erklären könnten. Nach D. GROSSER (1977) und R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER (1985) unterscheidet sich der anatomische Aufbau des Aspenholzes nicht von demjenigen der anderen Pappelarten.

b. Radialprofil

Das Härteprofil im Radialschnitt besteht aus in axialer Richtung verlaufenden Gräben, Rinnen, Härtewellen und -bändern, die der axialen Fortsetzung des vorstehend beschriebenen Querschnittsprofils entsprechen. Dies zeigt, daß sowohl Härterippen als auch intraannuelle Dichteschwankungen nicht nur eine oberflächige Erscheinung des Querschnittsprofils sind, sondern daß sie Bestandteile eines dreidimensionalen Gerüstes darstellen. Somit treten Härteunterschiede und Dichteschwankungen auch im Radialprofil deutlich in Erscheinung.

c. Tangentialprofil

Das Tangentialprofil ist ebenfalls durch eine vertikale Struktur geprägt, die aus in axialer Richtung verlaufenden Härterippen besteht. Diese entsprechen den diagonalen Härterippen des Querschnittsprofils.

Im Radial- wie im Tangentialprofil verursacht intensive Reaktionsholzbildung eine Verfilzung der Oberfläche.

Wie im Querschnittprofil schon festgestellt wurde, sind Holzstrahlen auch im Radial- und Tangentialprofil weder durch Erhöhungen noch durch Vertiefungen zu erkennen.

WEIDE (*Salix* spp.)

Das an Proben aus 4 verschiedenen Weidenbäumen untersuchte Querschnittprofil zeichnet sich durch einen deutlichen, diagonal- ver- netzten Raster aus, welcher dem Härteraster der Pappel sehr ähnlich ist (Abb. 35 c). Die Härterippen weisen jedoch nur eine Breite von ca. 50 μm (Frühholz) bis 100 μm (Spätholz) auf. Sie bilden deshalb ein feineres Muster als bei Pappel (Abb. 35 a). Die Härterippen treffen in einem Winkel von 60 bis 90° aufeinander.

Der Härteverlauf im Jahrring und das Vorkommen von intraannuellen Dichteschwankungen entsprechen den bei Pappel gefundenen Verhältnissen.

Zwischen den beiden Gattungen *Salix* und *Populus* besteht, wie auch zwischen den einzelnen Arten, ein weitgehend übereinstimmender anatomischer Aufbau. Einziges mikroskopisches Unterscheidungsmerkmal sind die Holzstrahlen, die bei den Pappelarten homogen, bei den Weidenarten dagegen heterogen aufgebaut sind (D. GROSSER 1977; R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985). Aufgrund des im Vergleich zum Querschnittprofil der Pappel insgesamt feiner strukturierten Härteraster der Weide deutet sich aber mit dem Sandstrahlverfahren eine Methode zur makroskopischen Unterscheidung der beiden Gattungen (Abb. 35) an.

Die Radial- und Tangentialprofile der Weide entsprechen denjenigen der Pappel.

ROSSKASTANIE (*Aesculus hippocastanum* L.)

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Die sandbestrahlte Querschnittoberfläche zeigt bei allen aus 4 verschiedenen Bäumen stammenden Proben einen weitgehend ungegliederten, groben Härteraster. Dieser besteht aus Kratern mit Durchmessern von 150 bis 400 μm . Stellenweise ist eine tangentiale Ordnung der Krater nachzuweisen, wodurch Härtewellen zwischen den tangential angeordneten Kratern entstehen (Abb. 36). Daneben laufen in radialer Richtung zahlreiche Härterippen und Rinnen innerhalb einzelner Jahrringe oder auch über mehrere Jahrringe hinweg.

Im Gegensatz zu Pappel und Weide liegen bei Roßkastanie die Gefäße vielfach in den harten Bereichen, wie Härterippen oder Härte-
wellen.

Die Jahrringgrenzen sind, abgesehen vom marknahen Bereich, nicht immer leicht zu bestimmen (Härteverlauf vom Grundtyp Birke). In vielen Jahrringen verläuft die Jahrringgrenze nicht am Rand der härtesten Spätholzschicht, da im letzten Spätholz die Härte in Richtung der Jahrringgrenze abnimmt. Die Jahrringgrenzen sind nur an einem schmalen, vielfach unterbrochenen Frühholzgraben zu erkennen. Dieser ist häufig in Richtung des Spätholzes durch ein Härteband oder eine Härte-
welle abgegrenzt (Abb. 37).

In den ersten 4 bis 5 marknächsten Jahrringen werden die Frühholz-
zonen wie bei Pappel und Weide sehr stark abgerieben.

Interpretation des Querschnittprofils

Die Gefäße der Roßkastanie weisen im Vergleich zu Pappel und Weide sehr kleine Durchmesser (durchschnittlich 50 μm) auf. Nach D. GROSSER (1977) sind sie einzeln und in radialen Gruppen bis zu 7, teilweise auch in kleinen Nestern angeordnet. Ferner besteht das Grundgewebe ausschließlich aus Libriformfasern, die im Querschnitt häufig zu Radialreihen geordnet sind.

Das vorstehend beschriebene Querschnittprofil spiegelt diesen anatomischen Aufbau nicht wider. So konnte durch den direkten Vergleich zwischen dem Querschnittprofil und den entsprechenden Mikroquerschnitten die Kratergröße oder deren Form nicht immer aus den Gefäßnestern und -gruppen abgeleitet werden.

An für diese Untersuchung angefertigten Mikroquerschnitten sowie an Präparaten aus der Institutssammlung wurde aber festgestellt, daß das Grundgewebe stellenweise aus dünnwandigen, weitleumigen Fasern, stellenweise aber auch aus dickwandigen, englumigen Fasern besteht. Diese sind innerhalb der Jahrringe, abgesehen von einigen tangentialen dichteren Zonen (intraannuellen Dichteschwankungen), unregelmäßig verteilt (Abb. 38). So können weitleumige Fasern zusammen mit Gefäßgruppen lockere, weiche Komplexe bilden, aus denen Krater durch Abrieb dünnwandiger Fasern und Erweiterung von Gefäßhäufungen entstehen könnten. Stellenweise sind die Gefäße und Gefäßgruppen aber auch in einem englumigen, dickwandigen Grundgewebe eingebettet, so daß eine Erweiterung durch Abrieb des umgebenden Grundgewebes verhindert wird. Dies könnte das häufige Vorkommen von Gefäßen in den harten Bereichen des Querschnittprofils erklären.

Ferner wurde festgestellt, daß an einigen Stellen weitleumige Gefäße und Fasergewebe, aber auch gefäßarmes, dichtes Fasergewebe schmale, radiale Bänder bilden, die sich über einzelne Jahrringe oder über mehrere Jahrringe erstrecken (Abb. 38). Diese radiale Streifung spiegelt sich im Querschnittprofil als radiale Rinnen bzw. Härterippen wider.

Im Anschluß an die ersten Frühholzgefäße wird häufig eine gefäßarme Zone gebildet. Diese entspricht der im Querschnittprofil beobachteten Frühholz-Härtewelle (Abb. 37). Somit liegt der höchste Gefäßanteil in vielen Jahrringen erst im 2. Fünftel der Jahrringe (Abb. 38).

Der Härterückgang im letzten Spätholz mancher Jahrringe beruht vermutlich auf der Zunahme der Faserdurchmesser in der Nähe der

Jahrringgrenze, wobei das Grundgewebe im letzten Spätholz dünnwandiger und weiltumiger erscheint als im Frühholz des nachfolgenden Jahrringes.

Die aus dem marknahen Bereich angefertigten Mikroquerschnitte zeigen, daß der Jahrringaufbau hier als halbringporig bezeichnet werden kann. Das Frühholz weist einen hohen Gefäßanteil auf, während das Spätholz von wenigen radialen Gefäßreihen durchzogen wird.

b. Radialprofil

Wie bei Pappel und Weide weist das Radialprofil der Roßkastanie eine vertikale Struktur auf, die aus Härtewellen, Gräben und Rinnen besteht. Diese entsprechen den für das Querschnittprofil beschriebenen tangentialen Strukturelementen. Darüber hinaus deutet sich aber - im Gegensatz zum Radialprofil der Pappel und Weide - eine schwach ausgeprägte Radialstruktur an, die durch flache, in quer-radialer Richtung und im Abstand von 100 bis 150 μm verlaufende, 300 bis 400 μm breite Härtewellen gebildet wird.

In diesen sind Holzstrahlen enthalten, so daß ihre Entstehung vermutlich auf eine stellenweise Anhäufung von Holzstrahlen zurückzuführen ist. Diese Vermutung wird durch Angaben von E. SCHMIDT (1941) bekräftigt, wonach die Holzstrahlen der Roßkastanie auf dem Tangentialschnitt meistens in "deutlichem, zickzackförmigem Stockwerkbau" angeordnet sind. So verhindern dicht hintereinander gestellte Holzstrahlen einen weiteren Abrieb der radialen Probenoberfläche. Es ist ferner auch anzunehmen, daß die einreihigen Holzstrahlen der Roßkastanie, die aus "derbwandigen" Zellen aufgebaut sind (Anonymus 1943 b), auf dem Radialschnitt insgesamt abriebfester sind als das umgebende Holzgewebe.

c. Tangentialprofil

Das Tangentialprofil besteht wie bei Pappel und Weide aus in axialer Richtung verlaufenden Härterippen, die aber schwächer ausgeprägt sind. Wie im Radialprofil beobachtet, deuten sich auch im Tangentialprofil quer-tangentiale Härtewellen an, die wiederum der stockwerkartigen Anordnung der Spindeln entsprechen.

LINDE (*Tilia* spp.)

Die beiden einheimischen Lindenarten, Winterlinde und Sommerlinde (*T. cordata* Mill. und *T. platyphyllos* Scop.), lassen sich holz-anatomisch nicht unterscheiden (D. GROSSER 1977). Da die Mehrzahl der hier untersuchten Proben botanisch nicht näher spezifiziert war, beziehen sich die folgenden Ausführungen allgemein auf Lindenholz.

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Die sandbestrahlte Querschnittsoberfläche der aus 7 verschiedenen Bäumen stammenden Proben zeigt eine Kraterstruktur, die aus vornehmlich in radialer Richtung angeordneten, rundlichen Vertiefungen besteht. Diese weisen einen Durchmesser von 150 bis 300 μm auf. In radialer Richtung ziehen sich zahlreiche feine (30 bis 80 μm breite) Härterippen über mehrere Jahrringe hindurch. Sie bestimmen die Härtestruktur des Frühholzbereiches und der stark abgeriebenen, weichen Jahrringe, da sie hier besonders stark ausgeprägt sind (Abb. 39). Daneben kommen stellenweise auch kurze diagonale Härterippen.

In breiteren Jahrringen kommen wie bei den zuvor beschriebenen Holzarten zahlreiche Dichteschwankungen vor.

Die Jahrringgrenzen werden jeweils durch den stärkeren Abrieb der Frühholzzone deutlich sichtbar (Härteverlauf vom Grundtyp Pappel). Entlang der Jahrringgrenze verläuft im Frühholz oft ein schmaler Graben, dem, wie auch bei Roßkastanie beobachtet, unmittelbar ein Härteband folgt, bevor die Härte in Richtung des Spätholzes allmählich ansteigt (Abb. 40).

Die Jahrringgrenzen, die im Lindenholz auf dem Querschnitt makroskopisch schwer zu identifizieren sind (H. KREMPL 1963), werden somit durch Sandstrahlbehandlung im Querschnittprofil deutlich sichtbar.

Im Gegensatz zu Roßkastanie sind bei Linde selten Gefäße in den harten Bereichen enthalten.

Der marknahe Bereich ist wiederum durch den starken Abrieb der Frühholzzonen, ferner durch eine hauptsächlich in radialer Richtung stark ausgeprägte Struktur gekennzeichnet, wie sie auch H. SCHULZ (1985) nachgewiesen hat (Abb. 41).

Am Querschnittprofil von jeweils einer Probe aus Winterlinde und Sommerlinde konnten weder in der Welligkeit noch im Härteraster artspezifische Strukturunterschiede festgestellt werden.

Interpretation des Querschnittprofils

Betrachtet man Mikroquerschnitte bei schwacher Vergrößerung (10:1), läßt sich feststellen, daß im anatomischen Aufbau des Lindenholzes eine radiale Struktur vorhanden ist. Oft sind die Holzstrahlen von Faserbändern umsäumt. Infolge der dichten Stellung dieser Holzstrahl-Faser-Komplexe ergeben sich zwischen ihnen radiale Gefäßfelder. Dadurch entstehen radial angeordnete Krater und Härterippen (Abb. 39).

Unmittelbar hinter der Jahrringgrenze findet sich in der Regel ein fast geschlossener Frühholzporenring. Anschließend folgt in den meisten Jahrringen eine schmale gefäßarme Zone. Diese entspricht dem im Querschnittprofil oft beobachteten Frühholz-Härteband (Abb. 40).

Durch die Sandstrahlstruktur im Querschnittprofil aufmerksam gemacht, wurde festgestellt, daß die Gefäße der marknahen Jahrringe vor allem im Spätholz überwiegend in radialer Richtung, d.h. zu langen radialen Gruppen, angeordnet sind. Gemeinsam mit den radialen Gefäßreihen verursachen die mit Fasern besäumten Holzstrahlen die auffällige radiale Struktur des marknahen Bereiches.

b. Radialprofil

Das Radialprofil ist durch eine stark ausgeprägte Längsstruktur gekennzeichnet. Wie bei den zuvor beschriebenen Holzarten entsprechen die in Längsrichtung verlaufenden Gräben und Härtewellen den tangentialen Strukturelementen des Querschnittprofils. Bei Linde

aber zeichnet sich das Radialprofil vor allem in den Frühholzonen und weicheren Jahrringen durch eine deutliche Radialstruktur aus. Diese ist vermutlich auf Holzstrahlen zurückzuführen, die wegen ihrer Breite (bis 6-reihig; D. GROSSER 1977) einen weiteren Abrieb der weichen Zonen verhindern.

c. Tangentialprofil

Das Tangentialprofil ist durch eine vertikale Struktur gekennzeichnet, die durch kurze (500 bis 5000 μm) Härterippen gebildet wird. Diese bestehen aus Holzstrahl-Faser-Komplexen, wie sie für das Querschnittprofil beschrieben worden sind. Im Härteprofil des durch das weiche Frühholz durchgeführten Tangentialschnittes treten die Härterippen besonders stark hervor. Somit bilden sie "Härtebrücken" über die weichen Frühholzonen.

ERLE (*Alnus spp.*)

Die Untersuchung der Härteprofile wurde an Proben aus 6 verschiedenen Schwarzerlen (*A. glutinosa* [L.] Gaertn.) und 6 verschiedenen Grauerlen (*A. incana* [L.] Moench) durchgeführt.

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Das Erlenholz zeigt auf dem sandbestrahlten Querschnitt eine teilweise diagonal- vernetzte, teilweise auch in tangentialer und radialer Richtung orientierte Struktur (Abb. 42).

Die Frühholzzonen sind fein, die Spätholzzonen dagegen grob strukturiert. Breitere Jahrringe zeigen dabei eine deutliche Gliederung: Der Frühholzbereich weist eine feine, schwach geordnete Struktur auf, während die Spätholzzone durch einen breiten, aber deutlich diagonal bis tangential vernetzten Härteraster gekennzeichnet ist (Abb. 42).

Diese Strukturierung der breiten Jahrringe erleichtert die Identifizierung der Jahrringgrenzen, die im Querschnittprofil vom Erlenholz mit stark ausgeprägten Hartewellen leicht zu verwechseln sind (vgl. 3.1.1.1.4). Bei 10-facher Vergrößerung lassen sich "echte Jahrringgrenzen" allerdings auch durch den abrupten Härteabfall unterscheiden, während Hartewellen einen allmählichen Härteanstieg und Härteabfall aufweisen (Abb. 42). Eine ähnliche Kennzeichnung stellte F. MAIER (1983) für falsche Jahrringgrenzen in Fichtenholz fest.

Die Scheinstrahlen treten sowohl im Frühholz als auch im Spätholz stark hervor. Ihre Härte variiert entsprechend dem Härteverlauf im Jahrring, so daß Hartewellen auch innerhalb von Scheinstrahlen sichtbar sind (Abb. 44a).

Das Querschnittprofil des jugendlichen Holzes ist bei Erle wie bei allen zuvor beschriebenen Hölzern durch einen starken Abrieb der Frühholzzonen und durch zahlreiche deutliche HärteWellen geprägt (Abb. 43).

Die beiden Erlenarten sind nach D. GROSSER (1977) und R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER (1985) weder makroskopisch noch mikroskopisch sicher zu unterscheiden. Die in der Literatur angegebenen Unterscheidungsmerkmale, wie Häufigkeit der Markflecken und Scheinstrahlen (E. SCHMIDT 1941), haben keinen allgemein gültigen Charakter (D. GROSSER 1977).

Anhand der untersuchten Proben aus 6 verschiedenen Schwarzerlen und 6 verschiedenen Grauerlen haben sich aber Unterschiede ergeben: Bei Schwarzerle überwiegt die radial-orientierte Struktur, während Grauerle durch eine eher diagonale Struktur gekennzeichnet ist (Abb. 44). Somit können die beiden Erlenarten in ihrem Querschnittprofil voneinander unterschieden werden.

Interpretation des Querschnittprofils

Durch den Vergleich zwischen Querschnittprofilen und den entsprechenden Mikroquerschnitten konnte nachgewiesen werden, daß der Härteraster wie bei Pappel, Weide und Linde durch eine Erweiterung und ein anschließendes Verschmelzen der Gefäße zu Rinnen oder Kratern entsteht. In den harten Bereichen sind deshalb selten Gefäße enthalten. Die charakteristische, gröbere Struktur der Spätholzzonen ist durch den geringeren Gefäßanteil bedingt (Abb. 42).

Der allgemeine Jahrringaufbau wird durch deutlich ausgeprägte intraannuelle Dichteschwankungen unterbrochen. Diese werden durch Schwankungen des Gefäßanteils und der Faserbreite und -wanddicke innerhalb einzelner Jahrringe verursacht (vgl. 3.1.1.1.4; Abb. 42).

In den marknahen Jahrringen ist im Mikrobild ebenfalls eine deutliche Zonierung zu erkennen, wobei gefäßarme, dichtere Zonen mit gefäßreichen Zonen alternieren (Abb. 43).

Vergleichende anatomische Untersuchungen an Mikroquerschnitten von Schwarzerlen- und Grauerlenproben ergaben keine Unterschiede, die die Abweichungen der jeweiligen Querschnittprofile erklären könnten.

b. Radialprofil

Der Härteverlauf des Querschnittprofils spiegelt sich auf dem Radialprofil wider: Vertikale Härtewellen und Gräben bestimmen die Struktur des Radialprofils. Darüber hinaus deutet sich auf der Strukturoberfläche eine kurzweilige, schwach ausgeprägte quer-radiale Streifung an. Diese ist vermutlich auf einzelne Holzstrahlen zurückzuführen. Dagegen treten Scheinstrahlen im Härteprofil stärker hervor.

c. Tangentialprofil

Das Tangentialprofil besteht aus in axialer Richtung verlaufenden kurzweiligen Rinnen und Härterippen. Stellenweise finden sich in gleicher Richtung auch stark ausgeprägte Härterippen, die den Scheinstrahlen entsprechen.

BIRKE (*Betula ssp.*)

Holzanatomisch lassen sich die beiden einheimischen Birkenarten, Sandbirke (*B. pendula* Roth) und Moorbirke (*B. pubescens* Ehrh.), nicht voneinander unterscheiden (D. GROSSER 1977). Bei den Proben aus der Institutssammlung, den Parkbäumen und dem Holzhandel (Tab. 1) konnte deshalb die jeweils vorliegende Birkenart nicht bestimmt werden. Von den 2 Sandbirken aus dem Universitätsforst (Tab. 1) wurden insgesamt 14 Stammscheiben analysiert.

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Die sandbestrahlte Querschnittoberfläche zeigt in allen untersuchten Proben aus 10 verschiedenen Bäumen einen deutlichen, diagonal-vernetzten, regelmäßigen Raster, wie dieser bereits von H. SCHULZ (1985) beschrieben worden ist. Die Härterippen treffen in einem Winkel von 40 bis 90° aufeinander und weisen eine Breite von 50 bis 100 µm auf. Innerhalb des diagonalen Rasters verlaufen mitunter auch kurze tangentielle Härterippen (Abb. 45).

Auffällig im Querschnittprofil der Birke sind ferner Härtebänder, die im ersten Frühholz aber auch an unterschiedlichsten Stellen im Jahrring verlaufen können (Abb. 46).

Wie bereits im Kapitel 3.1.1.1 angedeutet, wird der Härteraster bei Birke in der Regel nicht durch die Jahrringgrenzen unterbrochen (Härteverlauf vom Grundtyp Birke). Er erstreckt sich vielmehr gleichmäßig über mehrere Jahrringe. Dies erschwert vor allem in engen Jahrringen die Bestimmung der Jahrringgrenzen, die erst bei 10-facher Vergrößerung als dunkelbraune, schmale Linien erscheinen (Abb. 47).

Ähnlich wie bei Pappel zeichnet sich der Härteraster der Birke im Stammfußbereich durch ein breiteres und deutlicheres Muster aus als in höheren Stammbereichen (Abb. 48). Dementsprechend scheinen auch die Härtebänder des Stammfußbereiches mächtiger zu sein.

Die marknahen Jahrringe zeigen im Querschnittprofil eine insgesamt feinere diagonal-vernetzte Struktur als das adulte Holz. Die Netzstruktur wird hier durch zahlreiche HärteWellen und -bänder, an der Jahrringgrenze aber auch durch einen tiefen und schmalen Graben im ersten Frühholz unterbrochen (vgl. 3.1.1.1.2).

Interpretation des Querschnittprofils

Unter dem Eindruck des diagonal-vernetzten Härterasters fällt bei der Betrachtung von Mikroquerschnitten und mit Kreide angeriebenen Querschnittsoberflächen auf, daß die Gefäße bzw. die Gefäßgruppen der Birke eine mehr oder weniger deutlich diagonale Anordnung zeigen. Die schmalen Grundgewebestreifen zwischen benachbarten Gefäßen und Gefäßgruppen werden durch das Sandstrahlen bei der Erweiterung der Gefäße abgerieben (Abb. 45 u. 47).

In den HärteWellen sind aber oft Gefäße anzutreffen, d.h. hier wurde eine Erweiterung der Gefäße verhindert. Ursache hierfür sind einerseits eine geringe Gefäßhäufigkeit, anderseits vermutlich ein dichteres Fasergewebe um die Gefäße.

Die im Querschnittprofil beobachteten Härtebänder entsprechen gefäßlosen Zonen innerhalb des Jahrringes (Abb. 46).

Nach D. GROSSER (1977) und R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER (1985) ist das Birkenholz durch einen gleichmäßigen anatomischen Aufbau gekennzeichnet: Die Gefäße sind gleichmäßig über den Jahrring verteilt. Das Grundgewebe besteht überwiegend aus mittelwandigen Libriformfasern, während die Jahrringgrenze lediglich durch 3 bis 4 Reihen aus radial abgeflachten, dickwandigen Libriformfasern markiert wird.

Untersuchungen von Mikroquerschnitten im Vergleich zum Querschnittprofil zeigen aber, daß sich die durch die Spätholzschichten verlaufenden Rinnen über die Jahrringgrenze in das Frühholz des folgenden Jahrringes fortsetzen. Somit sind die Jahrringgrenzen durchbrochen. Diese Durchbrechungen entsprechen den von H.H. BOSSHARD (1976) beschriebenen Jahrringbrücken, die

Vernetzungen von Gefäßen über die Jahrringgrenze hinweg bezeichnen. Die Härteraster sind somit bei der Birke jahrringgrenzenunabhängig (Abb. 47).

Viele Jahrringe des adulten Birkenholzes enthalten im ersten Frühholz nur wenig Gefäße. Darüber hinaus ist, wie Abbildung 47 zeigt, das Übergangsholz im Vergleich zum Früh- und Spätholz oft durch eine höhere Gefäßhäufigkeit sowie durch breitere Faserlumina gekennzeichnet. Dies erklärt die oben geschilderte gleichmäßige Struktur des Querschnittsprofils, in dem die Jahrringgrenzen schwer zu bestimmen sind.

Die marknahen Jahrringe sind aber besonders im Frühholz durch zahlreiche Gefäße gekennzeichnet. In Richtung des Spätholzes nimmt der Gefäßflächenanteil rasch ab. Das jugendliche Holz der Birke ist somit halbringporig aufgebaut. Dabei bilden die zuerst angelegten Frühholzgefäße der marknahen Jahrringe einen fast geschlossenen, einreihigen Gefäßring entlang der Jahrringgrenze. Dieser bisher nicht beschriebene anatomische Aufbau wurde in den ersten 4 bis 6 marknächsten Jahrringen aller untersuchten Proben beobachtet (Abb. 49). Dadurch werden die Jahrringe des jugendlichen Holzes deutlich abgesetzt.

b. Radialprofil

Im Radialprofil setzen sich Härtewellen, -bänder und -rippen des Querschnittsprofils in der axialen Richtung fort. Darüber hinaus deutet sich auf der Strukturoberfläche, wie bei Erle, eine schwache quer-radiale Streifung an. Diese ist ebenfalls auf die Holzstrahlen zurückzuführen.

c. Tangentialprofil

Die Oberflächenstruktur des Tangentialprofils setzt sich aus vertikalen Härterippen zusammen, die den diagonalen Härterippen des Querschnittsprofils entsprechen.

AHORN (*Acer spp.*)

Untersucht wurden Härteprofile der drei einheimischen Ahornarten, Bergahorn, Spitzahorn und Feldahorn (Tab. 1). Diese sind makroskopisch schwer zu unterscheiden. Mikroskopisch läßt sich dagegen Feldahorn aufgrund der schmalen Holzstrahlen (2- bis 3-reihig) sicher identifizieren (E. SCHMIDT 1941).

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Im Querschnittprofil der aus insgesamt 24 verschiedenen Ahornbäumen stammenden Proben sind die Krater stellenweise diagonal angeordnet. Dadurch entsteht zum Teil ein diagonal-vernetzter Härteraster (Abb. 50). Die Krater weisen Durchmesser von 150 bis 500 µm auf.

Mitunter wird die Kraterstruktur durch radial verlaufende, dünne Härterippen beeinflusst, die besonders in den weicheren Jahrringen und Jahrringzonen deutlich hervortreten.

In den härteren Bereichen des Querschnittprofils bleiben häufig Gefäße erhalten (Abb. 50 u. 51).

Obwohl das gesamte Querschnittprofil sehr gleichmäßig erscheint (Grundtyp Birke), sind die Jahrringe dennoch in der Regel durch einen allmählichen, wenn auch geringfügigen, Härteanstieg vom Frühholz zum Spätholz deutlich gekennzeichnet.

Stärker strukturiert sind die marknahen Jahrringe, die zunächst durch den tiefen Abrieb der Frühholzonen deutlich voneinander abgesetzt sind. Wie von H. SCHULZ (1985) auch beobachtet, zeichnet sich der marknahe Bereich durch eine im Vergleich zum adulten Holz ausgeprägte Radialstruktur aus.

Die Untersuchung der Querschnittprofile von Proben aus jeweils 13, 8 und 3 verschiedenen Stämmen von Berg-, Spitz- und Feldahorn ergab, daß Spitz- und Feldahorn zu einer im Vergleich zu Bergahorn insgesamt gröberen Härtestruktur neigen (Abb. 51). Auf den härteren Bereichen des Querschnittprofils von Spitz- und Feldahorn finden sich zahlreiche Gefäße. Bei Feldahorn ist außerdem die radiale Struktur weniger ausgeprägt.

Interpretation des Querschnittprofils

Eine anatomische Besonderheit des Ahornholzes sind Gefäßscheiden aus dickwandigen, englumigen Fasern, die im funktionstüchtigen Splintholz lebend sind und u.a. Stärke führen (Anonymus 1942; F. WOLKINGER 1970). Bei der Betrachtung von Mikroquerschnitten unter schwacher Vergrößerung (10:1) und mit Kreide angeriebenen Querschnittoberflächen läßt sich auch feststellen, daß die Gefäße und Gefäßgruppen von einem dunkler erscheinenden Grundgewebe umgeben sind (Abb. 52). Zwischen den teilweise diagonal angeordneten Gefäßen einschließlich ihrer Faserscheiden liegen dementsprechend ebenso diagonal gerichtete hellere Gewebebereiche. Diese bestehen aus dünnwandigen, weitleumigen Fasern.

Durch diesen holzanatomischen Aufbau wird das Querschnittprofil des Ahornholzes bestimmt. Die harten Gefäßscheiden aus dickwandigen Fasern verhindern die Erweiterung der Gefäße durch den Sandstrahlabrieb und somit die Bildung durchgehender Verbindungsrinnen zwischen benachbarten Gefäßen, wie diese z.B. für Pappel und Birke charakteristisch sind. Die beobachteten Krater entsprechen größtenteils dünnwandigen Gewebebereichen.

Im Zuge der Interpretation der in einigen Jahrringen gefundenen Härtewellen wurde eine für Ahorn bisher noch nicht beschriebene, tangentielle Zonierung im anatomischen Aufbau mancher Jahrringe festgestellt. Diese wird durch hellere, aus dünnwandigen, weitleumigen Fasern bestehende, tangentielle Bänder gebildet (Abb. 53).

Die beobachtete Radialstruktur wird durch die relativ breiten, dicht gestellten Holzstrahlen des Ahorns hervorgerufen, die in weicheren Zonen und in den marknahen Jahrringen abriebfester sind als das umgebende Grundgewebe.

Die festgestellten Unterschiede zwischen Berg-, Spitz- und Feldahorn dürften nach den mikroskopischen Befunden zunächst darauf zurückzuführen sein, daß die Gefäßscheiden bei Spitz- und Feldahorn großflächiger erscheinen als bei Bergahorn. Zudem ist das Holz des Spitz- und Feldahorns schwerer als das Holz des Bergahorns (F. KOLLMANN 1951; K. v. WEDEL 1966).

Die fehlende bzw. schwächer ausgeprägte Radialstruktur im Querschnittprofil des Feldahorns ist auf die im Vergleich zu Berg und Spitzahorn geringere Breite der Holzstrahlen (E. SCHMIDT 1941) zurückzuführen.

b. Radialprofil

Das Härteprofil wird aus vertikalen Härtewellen und -rippen gebildet. Außerdem ist eine in quer-radialer Richtung verlaufende, feine Streifung zu erkennen. Diese setzt sich aus 200 bis 500 μm breiten Härtewellen zusammen, die durch die abriebfesten Holzstrahlen verursacht werden (Abb. 54).

c. Tangentialprofil

Die Holzstrahlen sind im Tangentialprofil als dünne, kurze (500 bis 1000 μm hohe), vertikale Härterippen deutlich zu erkennen. Dazwischen verlaufen breitere Härterippen, die den Kraterrändern des Querschnittprofils entsprechen.

BUCHE (*Fagus sylvatica* L.)

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Innerhalb eines durch die Spätholz-Härtewellen und die breiten Holzstrahlen gebildeten, rechteckigen Rasters (H. SCHULZ 1982, 1985) zeigt das Querschnittprofil der Buche eine Feinstruktur. Wie an Proben aus 6 verschiedenen Bäumen festgestellt wurde, besteht diese aus mehr oder weniger kurzen, gewellten Härterippen, die überwiegend in tangentialer, teilweise aber auch in schräger oder radialer Richtung verlaufen (Abb. 55).

Die Holzstrahlen scheinen weicher zu sein als das Grundgewebe des letzten Spätholzes. Somit bestimmen sie durch schwache Rinnenbildung die radiale Feinstruktur auf der Oberfläche der Spätholz-Härtewellen. Im Frühholz ragen die breiten Holzstrahlen dagegen stark hervor und bilden "Verbindungsbrücken" zwischen den Spätholz-Härtewellen aufeinanderfolgender Jahrringe (Abb. 55).

Sowohl enge als auch breite Jahrringe sind jeweils durch eine stark hervortretende Spätholz-Härtewelle deutlich markiert (Abb. 55). Nur in breiten Jahrringen werden in der Regel wenig ausgeprägte Härte-Wellen im vom Früh- zum Spätholz allmählichen Härteanstieg sichtbar (Abb. 56).

Im marknahen Bereich ist das Frühholz wie bei den anderen untersuchten zerstreutporigen Holzarten besonders weich. Die jugendlichen Jahrringe weisen ebenfalls zahlreiche Härte-Wellen auf.

Interpretation des Querschnittsprofils

Die Gefäße der Buche zeigen keine Anordnung in eine bestimmte Richtung, wie z.B. die der Pappel oder Birke. Die Feinstruktur innerhalb der rechteckigen Rastermaschen entsteht durch den Abrieb eng benachbarter Gefäße. Das Grundgewebe, das bei Buche überwiegend aus dickwandigen Libriformfasern besteht (D. GROSSER 1977), wird durch den Sandstrahl wenig abgerieben und bildet in den Rastermaschen die oben beschriebenen gewellten Härterippen (Abb. 57).

Das letzte Spätholz, das aus besonders dickwandigen Libriformfasern und wenigen engen Gefäßen besteht, ist in den Mikroquerschnitten meist deutlich abgesetzt. So bilden sich die stark hervortretenden Spätholz-Härtewellen. Die auf den Härtewellen verlaufenden radialen Rinnen zeigen, daß die Holzstrahlen weicher sind als das dichte Spätholzgewebe.

b. Radialprofil

Das Radialprofil zeichnet sich durch die stark ausgeprägten Spätholz-Härtewellen aus. Zwischen diesen verlaufen vertikale Härterippen, die die axiale Fortsetzung der im Querschnittsprofil beobachteten Härterippen darstellen. Außerdem bilden die breiten Holzstrahlen eine deutlich erkennbare, quer-radiale, breite Streifung der Oberfläche.

c. Tangentialprofil

Die Spindeln der breiten Holzstrahlen treten im Tangentialprofil als kurze Härterippen deutlich hervor. Zudem verlaufen im Tangentialprofil des Frühholzbereiches vertikale Härterippen.

PLATANE (*Platanus* spp.)

Die Hölzer der 3 Platanenarten, *P. occidentalis* L., *P. orientalis* L. und *P. x acerifolia* (Ait.) Willd. sind weder makroskopisch noch mikroskopisch zu unterscheiden (D. GROSSER 1977). Die folgenden Beschreibungen beziehen sich deshalb auf die Gattung *Platanus*.

a. Querschnittsprofil

Makroskopische Beschreibung

Das an 2 verschiedenen Proben untersuchte Querschnittsprofil der Platane weist eine radiale Struktur auf. Die breiten Holzstrahlen zeichnen sich im weichen Frühholz durch deutlich hervortretende, in regelmäßigen Abständen verlaufende radiale Härterippen aus. Auf den Härtewellen sowie im Übergangsholz sind sie im Gegensatz zu den breiten Holzstrahlen der Buche im Härteraster teilweise nicht mehr zu erkennen oder erscheinen als radiale Rinnen (Abb. 58).

Die Feinstruktur setzt sich, ähnlich wie bei Buche, aus kurzen gewellten Härterippen zusammen, die aber im Vergleich zu denjenigen der Buche nicht deutlich abgesetzt sind (Abb. 59).

Die jugendlichen Jahrringe der Platane sind ebenfalls von zahlreichen Härtewellen durchzogen.

Interpretation des Querschnittsprofils

Die Gefäße der Platane sind wie bei Buche zahlreich und zeigen ebenfalls keine Anordnung in einer bestimmten Richtung. Die Feinstruktur entsteht durch Verschmelzen benachbarter Gefäße (Abb. 59). Der hohe Anteil an Fasertracheiden (D. GROSSER 1977) und die damit verbundene, im Vergleich zu Buche geringere Wandigkeit des Grundgewebes (R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985) führen wahrscheinlich zu der unscharf erscheinenden Feinstruktur des Querschnittsprofils.

Die im Vergleich zu Buche geringe Abriebfestigkeit der breiten Holzstrahlen im Querschnittprofil der Platane ist vermutlich auf die Größe der einzelnen Holzstrahlzellen bzw. den gesamten Zellwandanteil innerhalb der Holzstrahlen zurückzuführen. Nach den Holzeigenschaftstafeln (Anonymus 1943 a) weisen die Holzstrahlzellen der Platane eine Höhe von 9 bis 28 μm auf, während für Buche eine Höhe von 3 bis 14 μm angegeben wird (Anonymus 1939).

b. Radialprofil

Die Welligkeit des Radialprofils entspricht derjenigen des Querschnittprofils. Die breiten Holzstrahlen bilden eine quer-radiale Streifung, die in den weichen Jahrringen und Jahrringzonen besonders deutlich erscheint.

c. Tangentialprofil

Das Tangentialprofil weist eine axiale Struktur auf, die aus stark hervortretenden dünnen Härterippen besteht. Diese Rippen sind auf die bei der Platane meist dicht untereinander liegenden Spindeln (Anonymus 1943 a) zurückzuführen.

HAINBUCHE (*Carpinus betulus* L.)

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

In den Querschnittprofilen der untersuchten Proben aus 5 verschiedenen Bäumen wird die Oberflächenstruktur von den stark hervortretenden Scheinstrahlen bestimmt, die stets härter sind als das umgebende Gewebe. In radialer Richtung wirkt der Härteverlauf im Jahrring relativ gleichmäßig (Grundtyp Birke). Die Jahrringe werden lediglich durch eine schwach ausgeprägte Härtevelle im Bereich des letzten Spätholzes markiert (Abb. 60). Der Jahrring-Härteverlauf spiegelt sich, wie für die Scheinstrahlen der Erle beschrieben, auch in der Oberfläche der Scheinstrahlen wider.

Zwischen den Scheinstrahlen bilden Härterippen im adulten Holz eine vorwiegend diagonal-vernetzte, deutliche Feinstruktur (Abb. 60). Im marknahen Bereich ist die Feinstruktur dagegen überwiegend radial- und tangential-vernetzt (Abb. 61). Bei starker Vergrößerung (ca. 20:1) weist die Oberfläche der Härterippen eine feine tangentiale Streifung auf.

Der Härteraster im Querschnittprofil des adulten Holzes wirkt über den ganzen Jahrring gleichmäßig. Wie bei Birke sind außerdem die schwach ausgeprägten Spätholz-Härtevelen an den Jahrringgrenzen vielfach durch Vertiefungen unterbrochen.

Interpretation des Querschnittsprofils

In den untersuchten Mikroquerschnitten der Hainbuche sind die Jahrringe vorwiegend durch das besonders dichte, dickwandige Spätholz abgesetzt. In den meisten Jahrringen des adulten Holzes wurde außerdem festgestellt, daß die Gefäße über den ganzen Jahrring gleichmäßig verteilt sind. Lediglich in ihrer Größe zeichnet sich eine allmähliche Abnahme vom Frühholz zum Spätholz aus. Dies erklärt den gleichmäßig erscheinenden Härteraster im Querschnittsprofil der Hainbuche (Abb. 60).

Neben der radialen Anordnung der Gefäße (D. GROSSER 1977) konnte durch vergleichende Untersuchungen der Querschnittprofile und zugehörigen Mikroquerschnitte eine diagonale Anordnung der Gefäße und Gefäßgruppen, wie bei Pappel und Birke, nachgewiesen werden. Die diagonalen Härterippen entsprechen somit dem Grundgewebe und enthalten im Gegensatz zu den harten Bereichen bei Roßkastanie oder Ahorn kaum Gefäße. Lediglich in den Spätholz-Härtewellen lassen sich diese stellenweise antreffen.

Außerdem wurde in den untersuchten Mikroquerschnitten festgestellt, daß Spätholzgefäß- und Gefäßtracheidengruppen im letzten Spätholz bis an die Jahrringgrenze stoßen. Sie stehen in Verbindung mit Gefäßgruppen des nächsten Frühholzes und bilden, wie bereits für Birke beschrieben, Jahrringbrücken (H.H. BOSSHARD 1976), die im Querschnittsprofil an den Vertiefungen in den Spätholz-Härtewellen zu erkennen sind (Abb. 60).

Im marknahen Bereich dagegen sind die meisten Jahrringe durch eine Anhäufung von Frühholzgefäßen deutlich markiert. Außerdem überwiegt hier die radiale Anordnung der Gefäße, die die radiale Vernetzung im Härteraster der marknahen Jahrringe verursacht. Die tangentielle Vernetzung ist andererseits durch das häufige Vorkommen von intraannuellen Dichteschwankungen bedingt.

Die an der Oberfläche der Härterippen beobachtete feine tangentielle Streifung ist auf einreihige Parenchymbänder zurückzuführen, die bei Hainbuche reichlich vorkommen (D. GROSSER 1977). Da die Parenchymzellen besonders weiträumig und dünnwandig sind, werden sie durch das Sandstrahlen stärker ausgefräst als das umgebende Grundgewebe.

b. Radialprofil

Das Radialprofil setzt sich aus axialen Härterippen und -wellen zusammen, die den im Querschnittprofil beschriebenen Strukturelementen entsprechen. Die Scheinstrahlen erscheinen als härtere, oft schief verlaufende, unregelmäßig breite Streifen.

c. Tangentialprofil

Die Scheinstrahlen sind im Tangentialprofil als deutlich hervortretende, langgezogene Härterippen zu erkennen. Dazwischen finden sich axiale, weniger ausgeprägte Härterippen, die als Fortsetzung von Härterippen des Querschnittprofils in axialer Richtung verlaufen.

GEMEINE HASEL (*Corylus avellana* L.)

a. Querschnittprofil

Makroskopische Beschreibung

Das an Proben aus 3 verschiedenen Stämmen untersuchte Querschnittprofil der Gemeinen Hasel zeigt eine dem Querschnittprofil der Hainbuche ähnliche Struktur, die durch die harten, stark hervortretenden Scheinstrahlen bedingt ist. Im Vergleich zu Hainbuche sind aber die Jahrringe der Gemeinen Hasel durch einen tiefen Frühholzgraben deutlich markiert.

Zwischen den Scheinstrahlen besteht der Härteraster aus unterschiedlich breiten Härterippen, die im Gegensatz zum Härteraster der Hainbuche vorwiegend radial orientiert sind. Diese sind im Spätholz besonders ausgeprägt. Im Bereich des ersten Frühholzes sind sie stark abgerieben und deshalb häufig unterbrochen. Dadurch unterscheiden sie sich von den Scheinstrahlen, die an der Jahrringgrenze einen nur leichten Härteabfall aufweisen (Abb. 62).

Die marknahen Jahrringe sind durch einen besonders tiefen Frühholzgraben gekennzeichnet, in dem die Härterippen aber auch die Scheinstrahlen kaum zu erkennen sind (Abb. 63).

Interpretation des Querschnittprofils

Die Gefäße der Gemeinen Hasel sind vorwiegend und auffällig in langen radialen Gruppen angeordnet (E. SCHMIDT 1941). Dementsprechend bilden sich zwischen den Gefäßreihen neben den Scheinstrahlen auch radiale Gewebestreifen, die ausschließlich aus Fasern bestehen. Diese entsprechen den unterbrochenen radialen Härterippen des Querschnittprofils (Abb. 62).

b. Radialprofil

Die Beschaffenheit des Radialprofils der Gemeinen Hasel entspricht den bei Hainbuche beschriebenen Härtestrukturen. Hiervon abweichend sind bei der Gemeinen Hasel die Frühholzzone tiefer abgerieben.

c. Tangentialprofil

Im Tangentialprofil besteht die Härtestruktur überwiegend aus stark hervortretenden axialen Härterippen, die den Scheinstrahlen entsprechen.

3.1.1.2.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

Aufgrund der vorstehend beschriebenen Härteprofile lassen sich die untersuchten zerstreutporigen Holzarten an sandbestrahlten Proben bei entsprechender Erfahrung mit bloßem Auge leicht unterscheiden. Vor allem im Härteraster ihrer Querschnittprofile zeichnen sich arttypische Muster ab, die als Grundlagen eines Schlüssels zur Bestimmung der zerstreutporigen Holzarten dienen können.

In Tabelle 10 sind die wichtigsten artdiagnostischen Merkmale der Querschnittprofile in Form eines Bestimmungsschlüssels zusammengefaßt. Die kontrastreichen Abbildungen (Orthochrom-Film-Aufnahmen) zeigen die jeweiligen Härteraster bei 2-facher Vergrößerung.

Tab. 10: Bestimmungsschlüssel für die untersuchten zerstreutporigen Holzarten nach makroskopischen Merkmalen ihrer Querschnittprofile (FH:Frühholz; SH: Spätholz; —>: Jahrringgrenze).

1 DIAGONAL-VERNETZTER HÄRTERASTER

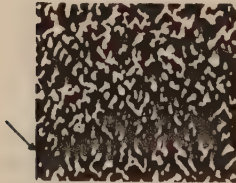
1.1 deutlich, mit tangentialen Verbindungen, JR meist nicht markiert:



BIRKE

gleichmäßige Struktur mit schwach ausgeprägten HärteWellen und -bändern; Holzstrahlen nicht sichtbar.

1.2 undeutlich im FH, JR meist deutlich markiert:



PAPPEL

breitmaschigere Struktur im SH; deutliche HärteWellen und -bänder; Holzstrahlen nicht sichtbar.

Aspe: verflochtener Härteraster.

1.3 undeutlich im FH, feinmaschiger als bei Pappel, JR meist deutlich markiert:



WEIDE

breitmaschigere Struktur im SH; deutliche HärteWellen und -bänder; Holzstrahlen nicht sichtbar.

1.4 vorwiegend im SH, auch radiale Struktur, stark ausgeprägte HärteWellen:



ERLE

undeutlich strukturiert im FH; deutlich breitmaschig im SH; stellenweise Scheinstrahlen als deutliche radiale Härterippen; Identifizierung der JR schwierig wegen falscher JR-Grenzen.

Grauerle: Tendenz zur diagonal orientierten Feinstruktur.
Schwarzerle: Tendenz zur radial orientierten Feinstruktur.

1.5 undeutlich, mit Kraterstruktur, JR meist schwach markiert:



AHORN

insgesamt gleichmäßige Struktur; HärteWellen und -bänder schwach ausgeprägt; Holzstrahlen teilweise als Härterippen erkennbar.

Bergahorn: relativ feine Struktur.

Spitzahorn: gröbere Struktur als Bergahorn.

Feldahorn: gröbere Struktur als Bergahorn, Holzstrahlen weniger ausgeprägt.

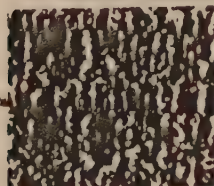
Tab. 10: Fortsetzung.

2 RADIAL-TANGENTIALER HÄTERASTER

2.1 feine radiale Streifung im FH, JR meist deutlich markiert:

**LINDE**SH grob strukturiert; deutliche Härte-
wellen; FH-Struktur durch Holz-
strahlen bestimmt.

2.2 breite radiale Streifung im FH, JR meist deutlich markiert:

**PLATANE**SH-Struktur aus kurzen gewellten Härte-
rippen, insgesamt aber undeutlich;
FH-Struktur durch breite Holzstrahlen
bestimmt; Härtewellen schwach ausgeprägt.

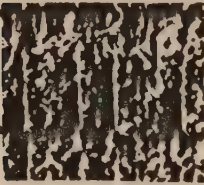
2.3 undeutlich, grobe Kraterstruktur, JR meist schwach markiert:

**ROSSKASTANIE**undefinierbare Kraterstruktur mit stellen-
weise radial und tangential angeord-
neten Kratern.

Tab. 10: Fortsetzung.

3 RECHTECKIGES HÄRTEPROFIL

3.1 fein strukturierter Härteraster, JR deutlich markiert:



BUCHE

breite Holzstrahlen als deutlich ausgeprägte radiale Härterippen, im kompakten letzten SH als radiale Rinnen.

3.2 grob diagonal-vernetzter Härteraster, JR meist schwach markiert:



HAINBUCHE

Scheinstrahlen als deutlich hervortretende radiale Härterippen; Härteraster deutlich und breitmaschig.

3.3 radialer Härteraster, JR meist deutlich markiert:



GEMEINE HASEL

Scheinstrahlen als deutlich hervortretende radiale Härterippen; Härteraster im FH undeutlich.

3.1.2 Halbringporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

Der halbringporige Jahrringaufbau zeichnet sich durch eine im Vergleich zum zerstreutporigen Jahrringaufbau deutliche Abnahme der Gefäßhäufigkeit (Kirschbaum) bzw. des Gefäßdurchmessers (Nußbaum) in Richtung des Spätholzes aus (D. GROSSER 1977; H. SUSS et al. 1978). Dieser Definition entsprechend wird im Jahrring-Härteprofil eine deutliche Zunahme der Härte vom Früh- zum Spätholz erwartet.

3.1.2.1 Beschreibung und Interpretation der Härteprofile

KIRSCHBAUM (*Prunus spp.*)

a. Welligkeit und Jahrringaufbau

An Querschnittprofilen und Dreieckproben aus jeweils 2 verschiedenen Stämmen der Vogelkirsche (*P. avium* L.) bzw. der Traubenkirsche (*P. padus* L.) wurde festgestellt, daß Jahrringe unter 5 mm Breite durch einen mehr oder weniger steilen Härteanstieg vom ersten Frühholz zum letzten Spätholz gekennzeichnet sind (Abb. 64). In den zugehörigen Mikroquerschnitten weisen schmale Jahrringe eine Abnahme der Gefäßhäufigkeit in Richtung des Spätholzes auf.

Breitere Jahrringe zeigen dagegen, abgesehen von einem tiefen, schmalen Frühholzgraben, einen wenig differenzierten Härteverlauf, der durch einen nur geringfügigen Härteanstieg in Richtung des letzten Spätholzes gekennzeichnet ist. Zudem kommen aber, wie H. SCHULZ (1985) an Einzelproben ebenfalls feststellte, zahlreiche schwach ausgeprägte Härtewellen bzw. -bänder vor (Abb. 64).

Der Jahrringaufbau breiter Jahrringe zeichnet sich durch eine Anhäufung von Gefäßen im ersten Frühholz aus. Diese bilden einen fast geschlossenen Ring entlang der Jahrringgrenze. Im Anschluß an das lockere Frühholz-Gewebe nimmt die Gefäßhäufigkeit rasch ab und bleibt bis zum letzten Spätholz relativ konstant.

b. Härteraster

Querschnittprofil

Im Querschnittprofil der aus jeweils 4 und 3 verschiedenen Vogel- bzw. Traubenkirschen stammenden Proben ist der Härteraster innerhalb des tief abgeriebenen Frühholzbereiches weitgehend ungegliedert. Dieser wird von zahlreichen radialen Härterippen durchzogen, die den breiteren der Holzstrahlen (bis 5-reihig: D. GROSSER 1977) entsprechen.

Im dichteren Übergangs- und Spätholz zeigt sich ein vorwiegend diagonaler bis diagonal-vernetzter, fein strukturierter Härteraster. Die diagonale Struktur ist auf eine bislang nicht beschriebene diagonale Anordnung der Gefäße und Gefäßgruppen zurückzuführen, die wie z. B. bei Pappel und Birke durch Abrieb des zwischen ihnen liegenden Grundgewebes zu diagonalen Rinnen verschmelzen. Breitere Jahrringe zeigen aber auch stellenweise eine tangentiale Struktur aus Härtebändern und tangentialen Rinnen. Diese entsprechen gefäßlosen bzw. gefäßreichen tangentialen Streifen, die besonders in breiteren Jahrringen des Kirschbaumes häufig vorkommen (Abb. 64).

Zugholzzonen sind durch einen gröber strukturierten, stärker hervortretenden Härteraster gekennzeichnet.

Radialprofil

Die Härtestruktur des Radialprofils setzt sich aus vertikalen Gräben, Härtewellen und -rippen zusammen, die den Frühholz-Gräben bzw. den Härtewellen und -bändern des Querschnittprofils entsprechen. Zudem zeichnet sich in der Profiloberfläche eine deutliche quer-radiale Streifung aus, die durch die breiten Holzstrahlen verursacht wird.

Tangentialprofil

Die diagonalen Härterippen des im Querschnittprofil beschriebenen Härterasters setzen sich als vertikale Härterippen im Tangentialprofil fort. In der Regel sind die Spindeln nicht erkennbar; lediglich im Tangentialprofil des ersten Frühholzes bleiben sie als dünne Härterippen erhalten.

Zwischen den Härteprofilen der Vogel- und Traubenkirsche, die sich in ihrem anatomischen Aufbau nicht unterscheiden (D. GROSSER 1977), konnten keine Strukturunterschiede festgestellt werden.

WALNUSS (*Juglans regia* L.) und SCHWARZNUSS (*J. nigra* L.)

a. Welligkeit und Jahrringaufbau

In den Querschnittprofilen aus 5 und 2 verschiedenen Proben der Walnuß bzw. der Schwarznuß zeigt sich vor allem innerhalb der über 2 mm breiter Jahrringe ein überraschend wenig differenzierter Härteverlauf (Abb. 65). Die Jahrringgrenzen werden durch makroskopisch kaum wahrnehmbaren Härteabfall im letzten Spätholz und Härteanstieg im ersten Frühholz angedeutet. Engere Jahrringe sind dagegen meistens durch einen Frühholz-Graben deutlicher abgesetzt. Ferner wurde festgestellt, daß in 94 % der untersuchten Jahrringe die härteste Holzschicht im Anschluß an die ersten Frühholzgefäße liegt.

Der gleichmäßige Härteverlauf im Querschnittprofil breiter Jahrringe ist auf die zerstreutporige Anordnung der Gefäße zurückzuführen. Die Abnahme der Gefäßgröße in Richtung des Spätholzes (D. GROSSER 1977) scheint keinen Einfluß auf den Härteverlauf zu haben. Der geringfügige Härteabfall im Spätholz der meisten Jahrringe läßt sich durch eine erneute Zunahme der Faserlumina im Bereich des Spätholzes erklären, so daß die Spät- und Frühholzfasern aufeinanderfolgender Jahrringe kaum Unterschiede in ihrer Breite und Zellwanddicke aufweisen. Engere Jahrringe sind durch eine deutlichere Abnahme des Gefäßanteils in Richtung Spätholz besser abgesetzt.

b. Härteraster

Querschnittprofil

Der Härteraster setzt sich überwiegend aus geschlängelten, meist diagonal gerichteten, bis 500 µm breiten Härterippen zusammen. Zudem kommen vor allem in den härteren Bereichen auch einzelne Krater vor. Wie bei der Birke setzen sich diagonale Härterippen auch über mehrere Jahrringe fort, so daß der Härteraster gleichmäßig und jahrring-unabhängig erscheint (Abb. 65).

Stellenweise deutet sich eine radiale und eine tangentiale Streifung an der Oberfläche der Härterippen an, die auf den tieferen Abrieb der breiten Holzstrahlen bzw. der tangentialen Längsparenchymbänder (D. GROSSER 1977) zurückzuführen ist.

Radialprofil

Die beschriebenen Härterippen des Querschnittprofils setzen sich in vertikaler Richtung fort. Zudem zeigt sich vor allem in den weicheren Zonen eine sehr feine quer-radiale Streifung, die durch die in dieser Richtung abriebfesteren Holzstrahlen bedingt ist.

Tangentialprofil

Im Tangentialprofil erscheinen die Härterippen des Querschnittprofils als vertikale Härterippen, die dem Faserverlauf entsprechend stellenweise wellenförmig verlaufen.

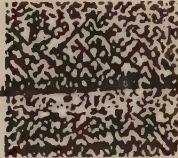
Nach Literaturangaben sind Walnuß und Schwarznuß mikroskopisch unterscheidbar. So gelten die Gefäße der Schwarznuß als gröber und fast ringförmig angeordnet (D. GROSSER 1977), während Walnuß insgesamt breitere Holzstrahlen, eine geringere Gefäßhäufigkeit und einen höheren Anteil an Längsparenchym aufweist (R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIDER 1985). In den Härteprofilen der beiden Arten konnten dennoch keine eindeutige Strukturunterschiede festgestellt werden, die zur sicheren Abgrenzung der beiden Arten führen können.

3.1.2.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

Die beiden untersuchten halbringporigen Hölzer unterscheiden sich zunächst grundsätzlich im Jahrring-Härteverlauf. Bei Kirschbaum sind die Jahrringe durch den tief abgeriebenen Frühholzbereich deutlich abgesetzt, während Nußbaum durch einen insgesamt gleichmäßigen Härteverlauf gekennzeichnet ist. Tabelle 11 faßt die wichtigsten artdiagnostischen Merkmale des Querschnittprofils zusammen.

Tab. 11: Bestimmungsschlüssel für die untersuchten halbringporigen Holzarten nach makroskopischen Merkmalen ihrer Querschnittprofile (FH: Frühholz; -->: Jahrringgrenze; Orthochrome Aufnahmen bei 2-facher Vergrößerung).

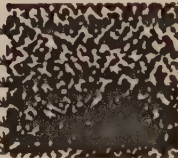
1 Jahrringe deutlich markiert; fein diagonal bis diagonal-vernetzter Härteraster:



KIRSCHBAUM

FH undeutlich strukturiert; breite Holzstrahlen im FH sichtbar.

2 Jahrringe schwach markiert; breiter, überwiegend diagonaler Härteraster:



NUSSBAUM

gleichmäßiger Härteraster aus diagonal angeordneten Kratern und diagonalen Härterippen; teilweise schwache radiale Riffelung durch Abrieb der Holzstrahlen.

3.1.3 Ringporige Laubhölzer der gemäßigten Zone

Ringporigkeit bedeutet, daß die weitleumigen Frühholzgefäße zu einem geschlossenen Ring entlang der Jahrringgrenze angeordnet sind, während im Übergangs- und Spätholz wesentlich kleinere Gefäße und überwiegend Librifasern gebildet werden. Damit sind die Jahrringe der ringporigen Holzarten in eine poröse Frühholzzone und einen dichten Übergangs-Spätholz-Bereich deutlich differenziert.

Im Unterschied zu den zerstreutporigen und halbringporigen Holzarten konnte bei den ringporigen Hölzern auf ergänzende mikroskopische Untersuchungen verzichtet werden, da sich die erhaltenen Härteprofile ohne Schwierigkeiten aus der allgemein bekannten anatomischen Struktur der Ringpore interpretieren lassen. Auch konnten aus ihren Radial- und Tangentialprofilen keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden. Deshalb wird im folgenden nur das Querschnittprofil beschrieben und interpretiert.

3.1.3.1 Beschreibung und Interpretation der Querschnittprofile

EICHE (*Quercus* spp.) (Abb. 66)

Die Frühholzzone bildet einen tiefen Graben entlang der Jahrringgrenze. Von dünnen harten Scheiden umgeben, sind die weitleumigen Frühholzgefäße auf dem Grabengrund deutlich zu erkennen. Zudem wird der Frühholzgraben von härteren radialen Rippen durchzogen. Hierbei handelt es sich in der Regel um breite Holzstrahlen einschließlich des sie umgebenden Grundgewebes. Eine entsprechende Beobachtung machte bereits H. SCHULZ (1985) an Einzelproben.

Die Übergangs- und Spätholzzone hebt sich von der Frühholzzone deutlich ab. Sie zeigt eine radial-geprägte Struktur, die aus unterschiedlich breiten Härterippen und Rinnen besteht. Die radialen Härterippen entsprechen dem dickwandigen Grundgewebe. In Richtung zum äußeren Spätholz nehmen sie eine flammenförmige,

geschlängelte oder gabelförmige Gestalt an. Zuweilen überbrücken sie den Frühholzgraben in Form einer dünnen Härterippe. Ihre Oberfläche zeigt eine feine tangentiale Riffelung, wobei weiche Rinnen die tangentialen Parenchymbänder darstellen. Die radialen Rinnen entsprechen dem Fasertracheiden-Tracheiden-Komplex (D. GROSSER 1977) mit den Spätholzgefäßreihen.

In breitringigen Eichenproben, in welchen die Härterippen des Spätholzes besonders ausgeprägt erscheinen, sind die Holzstrahlen stets weicher als das umgebende Grundgewebe. In engringigem Holz bestimmen sie dagegen die Härtestruktur, da in schmalen Jahrringen kaum Spätholzzonen angelegt sind (H. v. PECHMANN 1958).

Aufgrund der Ergebnisse von 3 untersuchten Roteichen- (*Quercus rubra* L.) und 4 Weißeichenproben (*Q. robur* L. oder *Q. petraea* Liebl.) läßt sich Roteiche von Weißeiche dadurch unterscheiden, daß bei der ersten die radialen Rinnen stets schmaler als die radialen Härterippen sind (Abb. 66). Dies bestätigt die Aussage von D. GROSSER (1977), wonach die Spätholzgefäße der Roteiche in schmal-radialen Reihen angeordnet sind. Die radialen Rinnen der Weißeiche sind dagegen häufig breiter als die Härterippen und erweitern sich meistens nach außen hin. Die Härte im Querschnittprofil der Weißeiche nimmt dadurch in Richtung des letzten Spätholzes insgesamt ab.

Einen weiteren Unterschied stellen die breiten Holzstrahlen dar, die im Querschnittprofil der Weißeiche generell deutlicher hervortreten als bei der Roteiche (H. SCHULZ 1985). Zwischen den Holzstrahlen der Weiß- und Roteiche konnten weder in ihrer Größe noch in ihrem anatomischen Aufbau Unterschiede nachgewiesen werden. Da aber die Holzstrahlen der Roteiche meistens innerhalb mächtiger Härterippen verlaufen, werden sie tiefer abgerieben als das umgebende Grundgewebe und scheinen somit insgesamt weicher zu sein als bei der Weißeiche.

ESCHE (*Fraxinus excelsior* L.) (Abb. 67)

Im Querschnittprofil bilden die Frühholzzonen einen tiefen Graben, auf dessen Grund die Gefäße deutlich erkennbar sind. Die einzelnen Gefäße sind durch 100 bis 200 μ m breite Härterippen getrennt.

Das Spätholz ist sehr kompakt und zeigt Krater, die den Spätholzgefäßen entsprechen. Eine Strukturierung des schmalen Spätholzbereiches ist in engen Jahrringen nicht zu erkennen. In breiten Jahrringen sind die Krater dagegen anfangs deutlich diagonal, später - im letzten Spätholz - zum Teil auch tangential angeordnet. Die Spätholzgefäß-Reihen bilden im letzten Spätholz breiter Jahrringe mehr oder weniger durchgehende, tangentielle Rinnen, da die aus dünnwandigen und weiltumigen Parenchymzellen bestehenden Gefäßscheiden eine Erweiterung der Spätholzgefäße ermöglichen. Nach F. KOLLMANN (1941) kann das Längsparenchym tangentielle Bänder zwischen den Spätholzgefäßen bilden, so daß gelegentlich mehrere Bänder im selben Jahrring konzentrisch verlaufen können.

Ein Einfluß der Holzstrahlen auf die Beschaffenheit des Querschnittprofils ist lediglich an der schwachen, feinen radialen Riffelung auf der Oberfläche der Spätholzbereiche zu erkennen.

EDELKASTANIE (*Castanea sativa* Mill.) (Abb. 68)

Im Querschnittprofil zeigt die Edelkastanie ebenfalls eine der Anordnung der Gefäße entsprechende Struktur. Im Anschluß an den Frühholzgraben besteht der Übergangs-Spätholz-Bereich aus diagonal bis radial verlaufenden Rinnen und Härterippen. Die Rinnen stellen die radialen bis schrägen Spätholzgefäße-Reihen (E. SCHMIDT 1941) dar.

Die Holzstrahlen sind weder durch Erhöhung noch durch Eintiefung im Querschnittprofil zu erkennen.

ROBINIE (*Robinia pseudoacacia* L.) (Abb. 69)

Auf dem Grabengrund des Frühholzgebietes sind die Gefäße deutlich erkennbar. Das kompakte Übergangs- und Spätholz zeigt überwiegend diagonal geordnete Krater, die stellenweise zu diagonalen Rinnen verschmelzen. Die Krater und Rinnen entsprechen den Spätholzgefäßen, die aufgrund der paratracheal-vasizentrischen bis -konfluenten Anordnung des Längsparenchyms (D. GROSSER 1977) durch den Sandstrahl erweitert werden.

Die Oberfläche der Kraterränder und Härterippen weist eine deutliche radiale Streifung auf. Diese entsteht durch stärkeren Abrieb der Holzstrahlen, die in einem besonders dichten, dickwandigen Grundgewebe eingebettet sind.

ULME (*Ulmus spp.*) (Abb. 70)

Wie bei den anderen ringporigen Holzarten ist der Frühholzbereich tief abgerieben. Die Frühholzgefäße sind auf dem Grabengrund erkennbar und durch radial bis diagonal verlaufende Härterippen voneinander getrennt. Diese stellen Holzstrahlen und Grundgewebe dar und bilden somit Härtebrücken zwischen den Spätholzzonen aufeinanderfolgender Jahrringe.

Der Anordnung ihrer Späthholzgefäße entsprechend zeigt die Ulme im Querschnittprofil eine quasi-geometrische Struktur. Im Anschluß an den Frühholzgraben bilden die Gefäße kurze oder mehrmals unterbrochene, schräg bis fischgrätenartig orientierte Rinnen. In breiten Jahrringen werden die Rinnen in Richtung zum letzten Spätholz kontinuierlich schmaler. Sie richten sich dabei immer mehr in tangentialer Richtung aus (H. SCHULZ 1985) und werden immer seltener unterbrochen. Anfangs weisen sie eine Breite von ca. 200 μm , im letzten Spätholz nur noch von ca. 50 μm auf.

Die Rinnen entsprechen den schräg-radialen bis tangentialen Bändern, die aus Späthholzgefäßen, Fasertracheiden und paratrachealem Längsparenchym bestehen (D. GROSSER 1977). Die dazwischen liegenden, 50 bis 200 μm breiten Härterippen stellen das Grundgewebe aus Libriformfasern dar.

Die Oberfläche der Späthholz-Härterippen weist infolge des stärkeren Abriebs der Holzstrahlen eine radiale Streifung auf.

3.1.3.2 Zusammenfassung der artdiagnostischen Härtestrukturen

Im Querschnittprofil der ringporigen Holzarten ist der Frühholz-Graben von diagonal bis radial verlaufende Härterippen durchzogen, die somit Härtebrücken zwischen den dichten Spätholzbereichen aufeinanderfolgender Jahrringe bilden. Der Übergangs-Spätholzbereich zeigt einen arttypischen Härteraster, der im allgemeinen durch die Anordnung der Spätholz-Gefäße und des Längsparenchyms bedingt ist. Die artdiagnostischen Merkmale der jeweiligen Härteraster sind in Tabelle 12 in Form eines Bestimmungsschlüssels zusammengefaßt.

Tab. 12: Bestimmungsschlüssel für die untersuchten ringporigen Holzarten nach makroskopischen Merkmalen des Härterasters im Übergangs-Spätholzbereich (Orthochrome Aufnahmen bei 2-facher Vergrößerung).

1 Härteraster aus Härterippen

1.1 radiale Struktur:



EICHE

deutlich hervortretende, geschlängelte bis gabelförmige Härterippen; tangentielle Riffelung.

Weißeiche: Härterippen meistens schmaler als Rinnen.
Roteiche: Härterippen meistens breiter als Rinnen.

1.2 deutliche diagonale bis tangentielle Struktur:



ULME

deutliche, quasi-geometrisch geordnete Härterippen; radiale Riffelung durch Abrieb der Holzstrahlen.

1.3 breite diagonale bis radiale Struktur:



EDELKASTANIE

diagonale bis radiale, breite Härterippen.

Tab. 12: Fortsetzung.

2 Überwiegend Kraterstruktur

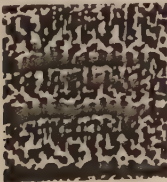
2.1 teilweise mit diagonalen bis tangentialen Rinnen:



ESCHE

kompakter Übergangs-Spätholz-Bereich mit diagonal bis tangential angeordneten Kratern; schwache, feine radiale Riffelung durch Abrieb der Holzstrahlen.

2.2 teilweise mit diagonalen Rinnen:



ROBINIE

kompakter Übergangs-Spätholz-Bereich mit überwiegend diagonal angeordneten Kratern; deutliche radiale Streifung durch Abrieb der Holzstrahlen.

3.1.4 Tropische Laubhölzer

Die Hölzer der subtropischen und tropischen Zone, meist allgemein als Tropenhölzer bezeichnet, weisen bedingt durch schwach ausgeprägte bzw. fehlende winterliche Vegetationsruhe keine Jahrringe auf. Sie sind, abgesehen von wenigen Ausnahmen (z.B. Teak), in der Regel zerstreutporig. Das rhythmische Wachstum wird hier durch Zuwachszonen gekennzeichnet, die im Holzkörper je nach Holzart oder Verbreitungsgebiet mehr oder weniger deutlich hervortreten.

Wie bei den ringporigen Holzarten läßt sich auch bei den tropischen Laubhölzern die Härtestruktur weitgehend aus ihrem allgemein bekannten anatomischen Aufbau herleiten. Anhand ausgewählter Beispiele werden in diesem Abschnitt an jeweils zwei Proben (Ausnahmen: jeweils eine Probe von Tiamu, Kosipo und Sapelli) die Querschnittprofile kurz beschrieben. Hierbei werden die Auswirkung des in den Tropenhölzern reichlich vorkommenden Längsparenchyms auf die Härtestruktur sowie die Beschaffenheit des Querschnittsprofils an der Grenze der Zuwachszonen besonders berücksichtigt.

3.1.4.1 Beschreibung und Interpretation der Querschnittprofile

ABACHI (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum.) (Abb. 71)

Die Härtestruktur des Querschnittsprofils besteht aus zerstreut, stellenweise diagonal wie auch tangential angeordneten Kratern und radial verlaufenden Rinnen. Die Krater stellen Gefäße dar, die besonders in den weichen Holzonen stark erweitert werden. Die radialen Rinnen entsprechen den Holzstrahlen, die von dünnwandigen Längsparenchymzellen umsäumt sind und dadurch vom Sandstrahl ebenfalls erweitert werden.

Eine Besonderheit im anatomischen Aufbau der Abachi stellt das stockwerkartig, apotracheal-leiterförmig angeordnete Längsparenchym dar, wobei einreihige Längsparenchymbänder regelmäßig mit ei-

ner Faserreihe abwechseln (R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985). Nach Literaturangaben (z.B. H. GOTTWALD 1958; Chr. SCHEIBER 1965) sind die Zuwachszonen durch unterschiedliche Gefäßdichte markiert. Durch den Härteverlauf im Querschnittprofil der untersuchten Proben aufmerksam gemacht, wurde aber festgestellt, daß manche Zonen unabhängig von der Gefäßhäufigkeit durch einen sehr hohen Anteil an weitleumigem, dünnwandigem Längsparenchym gekennzeichnet sind. Dementsprechend werden diese infolge des geringen Zellwandanteils vom Sandstrahl stärker abgerieben. Nach außen hin nimmt der Anteil und die Zellwanddicke der Fasern zu, was zu einer höheren Abriebfestigkeit führt. Wahrscheinlich stellen weiche Bereiche Anfangszonen innerhalb der Zuwachszonen dar, die folglich im Querschnittprofil deutlich voneinander abgesetzt erscheinen.

AFZELIA (*Afzelia* spp.) (Abb. 72)

Das Querschnittsprofil zeichnet sich durch eine wabenförmige Struktur aus, die bei hoher Gefäßhäufigkeit eine Tendenz zur diagonalen Vernetzung zeigt. Diese ist auf die diagonale Anordnung der Gefäße bzw. -gruppen zurückzuführen. Das paratracheal-aliform bis -konfluent verteilte Längsparenchym (E. SCHMIDT 1951) ermöglicht eine Erweiterung der einzelnen Gefäße zu oval- bis augenförmigen Kratern bzw. durchgehenden diagonalen Rinnen.

Die Oberfläche der Härterippen zeigt eine schwache radiale Riffelung, die vermutlich durch Abrieb der dünnwandigen Holzstrahlen entsteht. Diese Riffelung kann aber auch auf die streng radiale Anordnung der Fasern zurückzuführen sein, die, wie an mehreren Mikroquerschnitten festgestellt, abwechselnd weitleumige und englumige radiale Gewebestreifen bilden.

Die Zuwachszonen sind im gleichmäßigen Härteverlauf des Querschnittsprofils durch eine feine, meistens deutlich erkennbare tangentiale Rinne markiert, die dem initialen bzw. terminalen Längsparenchymband (R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985) entspricht.

BALSA (*Ochroma spp.*) (Abb. 73)

Das Querschnittprofil weist eine ähnliche Struktur wie bei Abachi (Abb. 71) auf. Bei Balsa ist das Härteprofil aber auffällig gröber strukturiert, indem die Gefäße besonders in den weichen Zonen stark erweitert und die radialen Rinnen zahlreicher und ausgeprägter sind.

Seiner geringen Rohdichte ($r_0 = 0,13 \text{ g/cm}^3$) entsprechend zeichnet sich Balsaholz durch ein sehr dünnwandiges Grundgewebe aus. Da sich die Längsparenchymzellen, die mengenmäßig etwa dem Faseranteil entsprechen, im Querschnitt kaum von den dünnwandigen Fasern unterscheiden (E. SCHMIDT 1951), wird die aus Kratern und radialen Rinnen bestehende Härtestruktur ausschließlich durch die Gefäße und Holzstrahlen bedingt.

Wie für Abachi beschrieben, zeigt das Querschnittprofil vom Balsaholz ebenfalls einen nach weichen und härteren Zonen differenzierten Härteverlauf.

BONGOSSI (*Lophira procera* A. Chev.) (Abb. 74)

Die Struktur des Querschnittprofils zeichnet sich durch in tangentialer Richtung verlaufende, stellenweise geschlängelte Härterippen aus, die das dickwandige Libriformfaser-Grundgewebe darstellen. Die zwischen ihnen entstandenen Rinnen entsprechen dem Längsparenchym, das vorwiegend apotracheal, in welligen tangentialen Bändern angeordnet ist (E. SCHMIDT 1940). Die Härterippen werden durch Krater unterbrochen, die den Gefäßen einschließlich ihrer Parenchymscheide (E. SCHMIDT 1940) entsprechen.

In radialer Richtung zeigt das Querschnittprofil einen gleichmäßigen Härteverlauf. Zuwachszonen sind weder durch Härteschwankungen noch durch Strukturunterschiede markiert.

KHAYA (*Khaya* spp.) (Abb. 75)

Unter dem Handelsname Khaya werden u. a. *K. ivorensis* A. Chev. und *K. anthotheca* C. DC. zusammen gehandelt. Die beiden Arten sind anatomisch nicht zu unterscheiden (Chr. SCHEIBER 1965). Die untersuchten Proben waren unter der Bezeichnung Khaya aufgeführt, d. h. botanisch nicht näher spezifiziert.

Das Querschnittprofil von Khaya ist überwiegend durch eine Kraterstruktur sowie deutlich ausgeformte radiale Rinnen und Härterippen gekennzeichnet. Die Krater, die den Gefäßen und Gefäßgruppen einschließlich ihrer Parenchymscheide entsprechen, sind in der Regel zerstreut und in diagonalen Reihen angeordnet. Stellenweise bilden sich diagonale und tangentielle Rinnen durch Verschmelzen benachbarter Gefäße. Die radialen Rinnen entstehen durch Abrieb der bis zu 8 Zellen breiten (E. SCHMIDT 1951) Holzstrahlen.

Zuwachszonen sind durch eine tangentielle Rinne oder manchmal auch durch einen Graben markiert. Die Rinne entspricht dem terminalen Parenchymband, während der Graben durch Abrieb einer an Gefäßen und Längsparenchym besonders reichen Grenzzone entsteht. Das terminale Parenchymband kann aber nach Angaben von E. SCHMIDT (1951) in manchen Proben fehlen.

Im Vergleich zu Abachi und Balsa ist eine Differenzierung des Härteverlaufes in weiche und härtere Zonen im Querschnittprofil von Khaya weniger ausgeprägt.

Entandrophragma spp.

Zur Gattung *Entandrophragma* gehören vier wichtige Handelshölzer, die insgesamt recht ähnlich strukturiert sind: Sipo (*E. utile* Sprague), Tiama (*E. angolese* C.DC.), Sapelli (*E. cylindricum* Sprague) und Kosipo (*E. candollei* Harms). Diese weisen jedoch arttypische Merkmale auf, wie z.B. verschiedenartige Anordnung des Längsparenchyms oder unterschiedliche Breite der Holzstrahlen (R. WAGENFUHR u. Chr. SCHEIBER 1985; D. NORMAND 1955), die sich auf die Struktur des Querschnittsprofils eindeutig auswirken. Die folgende Ausführung bezieht sich auf das Querschnittsprofil von zwei verschiedenen Proben von Sipo und - zum Vergleich - jeweils einer Probe von Tiama, Sapelli und Kosipo.

a. SIPO (Abb. 76)

Sipo weist eine radial gestreifte, diagonale Kraterstruktur auf, die derjenigen der Khaya (Abb. 75) ähnlich ist. Hiervon abweichend ist bei Sipo die radiale Streifung weniger deutlich ausgebildet. Dies ist vermutlich auf die Holzstrahlen zurückzuführen, die bei Sipo überwiegend 2- bis 3-reihig (J.D. BRAZIER u. G.L. FRANKLIN 1961), bei Khaya bis 8-reihig sind (E. SCHMIDT 1951).

Die Zuwachszonen sind jeweils durch eine oder mehrere tangentiale Rinnen deutlich markiert. Diese entsprechen durchgehenden terminalen Längsparenchymbändern, die im Vergleich zu Khaya stets an der Grenze der Zuwachszonen zu finden sind (E. SCHMIDT 1951).

b. TIAMA (Abb. 77)

Das Querschnittsprofil der Tiama wirkt durch die deutlich radial gestreifte Kraterstruktur demjenigen der Khaya sehr ähnlich. Der Härteraster der Tiama ist aber insgesamt feiner strukturiert, die terminale Rinne dünner und weniger ausgeprägt als bei Khaya.

Im Vergleich zu Khaya und Sipo weist Tiama weniger Längsparenchym auf. Es kommt in der Regel lediglich als terminales Band und aliforme Gefäßscheiden vor (D. NORMAND 1955). Deshalb sind im Querschnittsprofil von Tiama diagonale und tangentiale Rinnen seltener und weniger ausgeprägt.

c. SAPELLI (Abb. 78)

Sapelli zeigt eine deutliche, überwiegend diagonale bis diagonal-vernetzte Struktur, die aus schwach radial-gestreiften, durch Krater mehrfach unterbrochenen Härterippen besteht. Stellenweise zeichnen sich aber einzelne Zuwachszonen bzw. Bereiche von Zuwachszonen durch eine tangentiale bis fischgrätenartige Anordnung der Härterippen aus.

Die aus Härterippen bestehende Struktur bildet sich durch Erweiterung der Gefäße und Abrieb des paratracheal bandförmig und vasizentrisch-aliform konfluent angeordneten Längsparenchyms (R. WAGENFUHR 1968 a).

Die Zuwachszonen sind durch eine dünne, ununterbrochene tangentiale Rinne und ein Härteband deutlich markiert, das entlang der terminalen Rinne im ersten Frühholz der meisten Zuwachszonen verläuft.

Die tangentiale Rinne stellt das terminale Längsparenchymband (D. NORMAND 1955) dar. Das Frühholz-Härteband entspricht einer dichteren, gefäßarmen Zone, die im ersten Frühholz der meisten Zuwachszonen gebildet wird. Dieser Befund konnte anhand von zum Vergleich herangezogenen Mikroschnitten aus der Institutssammlung bestätigt werden.

d. KOSIPO (Abb. 79)

Bei Kosipo überwiegt eine tangential gerichtete Härtestruktur. Diese setzt sich aus dicht nacheinander verlaufenden, durch Krater vielfach unterbrochenen, tangentialen Härterippen zusammen. Ihre Oberfläche weist eine feine, aber deutliche radiale Streifung auf.

Die zwischen den tangentialen Härterippen verlaufenden Rinnen entstehen durch Abrieb des Längsparenchyms, das bei Kosipo als breite, durchgehend tangentiale Bänder vorkommt. Die radiale Streifung ist durch den stärkeren Abrieb der bis zu 5 Zellen breiten Holzstrahlen (H. GOTTWALD u. E. SCHWAB 1975) bedingt.

Innerhalb dieser deutlich ausgeprägten tangentialen Härtestruktur sind die terminalen Rinnen, wie die entsprechenden terminalen Längsparenchymbänder auf dem glatten Probenquerschnitt, schwer zu erkennen. Deshalb lassen sich Zuwachszonen im Querschnittprofil von Kosipo nur schwer identifizieren. Stellenweise finden sich aber breitere, mächtigere Härtebänder, die wahrscheinlich - wie bei Sapelli - jeweils dem ersten Frühholz-Bereich entsprechen und somit zur Markierung der Zuwachszonen beitragen könnten.

3.1.4.2 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Härtestruktur im Querschnittprofil der untersuchten Tropenhölzer ist in erster Linie durch Abrieb des Längsparenchyms bedingt. Da die verschiedenen Hölzer meistens durch eine arttypische Anordnung ihres Längsparenchyms gekennzeichnet sind, entstehen arttypische Härtestrukturen. Die in der Literatur angegebenen makro- und mikroskopischen Merkmale lassen sich in den wenigen untersuchten Querschnittprofilen deutlich darstellen.

Darüber hinaus konnte bei Abachi und Balsa, in denen die Zuwachszonen schwach bzw. nicht markiert sind, eine Differenzierung des Härteverlaufes innerhalb von Zuwachszonen nachgewiesen werden.

Die wichtigsten Merkmale der verschiedenen Arten bzw. -gruppen sind in Tabelle 13 zusammengefaßt.

Tab. 13: Makroskopische Unterscheidungsmerkmale im Querschnittprofil ausgewählter Tropenhölzer.

Holzart	Überwiegende Härtestruktur	Einfluß der Holzstrahlen	Markierung der Zuwachszonen
Balsa	Krater (grob)	+++	+++ (Härte)
Abachi	Krater	+++	+++ (Härte)
Afzelia	wabenförm. Krater	(+)	+ (Rinne)
Khaya	Krater	+++	+ (Rinne)
Sipo	Krater	+	+++ (Rinne)
Tiama	Krater	+++	+ (Rinne)
Sapelli	diag. Härterippen	(+)	+++ (Rinne)
Kosipo	tang. Härterippen	+++	(+) (Band)
Bongossi	tang. Härterippen	-	-

- : nicht sichtbar

(+) : nicht deutlich

+ : schwach ausgeprägt

+++ : stark ausgeprägt

3.2 Holzeigenschaften

Im vorstehenden Kapitel 3.1 konnte mit Hilfe der Sandstrahlmethode gezeigt werden, daß der Holzkörper von einem dreidimensionalen Gerüst aus Härtestrukturen durchzogen wird. Im Querschnittprofil der untersuchten Holzarten sind die Härtewellen, -bänder und -rippen, die Verdichtungen des Holzgewebes, Grundgewebestreifen oder auch teilweise Holzstrahlen entsprechen, nach verschiedenen Mustern verknüpft. Darüber hinaus weisen die jeweiligen Holzarten einen charakteristischen Härteverlauf auf.

In Tabelle 14 sind die untersuchten Holzarten aufgelistet, deren Härtestrukturen möglicherweise Einflußfaktoren der artspezifischen Holzeigenschaften darstellen.

Tab. 14: Härteverlauf und Orientierung der Härtestrukturen im Querschnittprofil der untersuchten Holzarten.

Holzarten	Härteverlauf	Orientierung der Härtestrukturen
Pappel	deutlich differenziert	<u>diagonale</u> Vernetzung zwischen tangentialen Härtewellen und -bändern
Birke	gleichmäßig	<u>diagonale</u> Vernetzung zwischen tangentialen Härtewellen und -bändern
Ahorn	gleichmäßig	Kraterstruktur mit Tendenz zur <u>diagonalen</u> Vernetzung
Linde	deutlich differenziert	<u>radiale</u> Härterippen zwischen tangentialen Härtewellen und -bändern
Buche	deutlich differenziert	<u>radiale</u> Härterippen zwischen den Spätholz-Härtewellen
Ulme	stark differenziert (ringporig)	Überwiegend <u>tangential</u> gerichtete Härterippen im Spätholz
Robinie	stark differenziert (ringporig)	Überwiegend <u>diagonal</u> gerichtete Härterippen im Spätholz

3.2.1 Querdruckfestigkeit

3.2.1.1 Interpretation der Kraft-Weg-Diagramme

Betrachtet man die während der Zusammendrückung (bis zu einer Stauchung von 10 %) der klimatisierten Querproben registrierten Kraft-Weg-Diagramme, zeichnen sich je nach Holzart und Richtung der Krafteinwirkung verschiedene Kurventypen ab. Abbildung 80 zeigt drei typische Formen von Kurven, die das Verhalten von radialen Querproben während der Krafteinwirkung darstellen.

Radiale Querproben

Kurve 1 zeigt im elastischen Bereich, d. h. im Bereich der direkten Proportionalität zwischen Zusammendrückung und Widerstandskraft, einen relativ flachen Verlauf. Dies deutet auf ein elastisches Verhalten der Probe hin. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze flacht sich der Kurvenverlauf allmählich ab. Der weitere Verlauf ist durch ein mehrfaches, plötzliches Nachlassen der Widerstandskraft gekennzeichnet, das irreversible Brüche im Probenkörper entspricht.

Der Verlauf der Kurve 1 kennzeichnet das Verhalten der radialen Querproben der Pappel und Linde. Beide Holzarten weisen einen deutlich differenzierten Härteverlauf auf. Die weicheren Frühholz-zonen und die zwischen Härtewellen liegenden weichen Bereiche, die im Querschnittprofil der beiden Holzarten beschrieben wurden, leisten einen geringen Widerstand. Sie lassen sich stark zusammendrücken und bestimmen somit das elastische Verhalten der radialen Querproben. Beim Erreichen einer bestimmten Kraft brechen sie plötzlich zusammen.

Kurve 2 zeigt im elastischen Bereich einen steileren Verlauf und deutet somit auf eine höhere Widerstandskraft der Probe hin. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze flacht sich die Kurve allmählich ab und weist anschließend deutlich ausgeprägte Knicke auf.

Der Verlauf der Kurve 2 stellt das Verhalten der radialen Querproben der ringporigen Holzarten Robinie und Ulme dar. Diese zeigen trotz des lockeren, im Querschnittprofil tief abgeriebenen Frühholz-Bereiches eine höhere Festigkeit und eine geringere Elastizität als Pappel und Linde. Daher ist zu vermuten, daß die im Querschnittprofil beschriebenen Härtebrücken, die den mehr oder weniger breiten Holzstrahlen sowie dem die Frühholz-Gefäße umgebenden Grundgewebe entsprechen, als Festigkeitsträger fungieren. Die deutlich ausgeprägten Knicke stellen nacheinander erfolgende Brüche innerhalb der einzelnen Frühholz-Bereiche dar.

Kurve 3 zeigt im elastischen Bereich einen der Kurve 2 ähnlichen Verlauf. Hiervon abweichend weist sie aber oberhalb der Proportionalitätsgrenze keine Knicke auf. In diesem Bereich zeichnet sie sich vielmehr durch einen leichten Anstieg aus, der auf eine allmähliche Verdichtung und Verfestigung des Holzgewebes hindeutet.

Der Verlauf der Kurve 3 ist charakteristisch für die radialen Querproben der zerstreutporigen Holzarten Birke und Ahorn. Diese sind in ihrem Querschnittprofil durch einen gleichmäßigen Härteverlauf gekennzeichnet, in dem lockere Zonen meist fehlen.

Bei Buche konnte ein ähnlicher Kurvenverlauf nachgewiesen werden, obwohl ihr Härteverlauf in weiche Frühholz- und härtere Spätholzzonen relativ deutlich differenziert ist. Die Holzstrahlen, die den hohen Volumenanteil von 27 % einnehmen und eine Breite und Höhe von bis 0,20 mm bzw. 4,00 mm aufweisen (Anonymus 1939), verhindern wahrscheinlich ein plötzliches Zusammenbrechen der relativ weichen Frühholzzonen.

Diagonale Querproben

Bei den diagonalen Querproben (Krafteinwirkung in einem Winkel von 45° zum Jahrringverlauf) ergeben sich für die jeweiligen Holzarten oberhalb der Proportionalitätsgrenze Kraft-Weg-Kurven, die einen ähnlichen Verlauf wie die vorstehend beschriebenen Kurven 1, 2 und 3 aufweisen. Der Härteverlauf der untersuchten Holzarten wirkt sich somit in den plastischen Deformationen bei radialer oder schräger Krafteinwirkung gleich aus. Generell ist aber der Verlauf im elastischen Bereich flacher, d.h. die diagonalen Querproben

sind insgesamt elastischer und weniger fest als die radialen Querproben.

Tangentiale Querproben

Bei den tangentialen Querproben aller untersuchten Holzarten weisen die Kraft-Weg-Kurven keine Knicke auf. Der Verlauf ist aber im elastischen Bereich flach und deutet somit auf ein elastisches Verhalten sowie eine geringere Festigkeit der tangentialen Querproben hin.

Ein den tangentialen Querproben entsprechendes Verhalten zeigen die im nassen Zustand geprüften radialen, tangentialen und diagonalen Querproben aller untersuchten Holzarten. Sie weisen somit insgesamt eine geringe Festigkeit, eine hohe Elastizität und keine Brüche auf. Im Vergleich zwischen den verschiedenen Richtungen zeichnen sich die radialen Querproben generell durch einen steileren Verlauf der Kurve im elastischen Bereich aus.

3.2.1.2 Bruchbilder im Querschnittprofil

Wie bereits durch den Verlauf der Kraft-Weg-Kurven angedeutet, weisen sandbestrahlte, im nassen Zustand geprüfte Querproben keine makroskopisch sichtbare Brüche auf. Im Querschnittprofil der im klimatisierten Zustand zusammengedrückten Querproben sind dagegen stark ausgeprägte Fließvorgänge und Formänderungen, die innerhalb der Probenkörper irreversibel erfolgen, makroskopisch zu erkennen.

An den Bruchstellen weisen die Härtestrukturalelemente unterschiedliche Deformationen auf: Der Verlauf der diagonalen Härterippen ist tangential abgeflacht (z.B. bei Pappel), radiale Härterippen sind vielfach abgelenkt (z.B. bei Buche). Zudem sind Bruchstellen auch an abgebrochenen, seitlich verschobenen Härterippen zu erkennen.

Radiale und diagonale Querproben

Bei Pappel und Linde (Kurve 1) sowie Robinie und Ulme (Kurve 2) sind deutlich sichtbare, jahrringparallel verlaufende Deformatio-

nen oder Brüche innerhalb der Härtestrukturelemente zu finden (Abb. 81). In erster Linie sind, wie erwartet, die lockeren Frühholzzonen betroffen. Zudem finden sich aber bei Pappel und Linde auch Bruchstellen zwischen den Härtewellen, bei Robinie und Ulme innerhalb der tangentialen und diagonalen Rinnen der Übergangs-Spätholzzonen.

Bei Birke, Ahorn und Buche (Kurve 3) verlaufen die Brüche ebenfalls jahrringparallel. Sie sind aber weniger ausgeprägt und nur selten im ersten Frühholz zu finden.

Tangentiale Querproben

Bei den untersuchten zerstreutporigen Holzarten sind im Querschnittprofil weder Brüche noch Deformationen innerhalb der Härtestrukturelemente nachzuweisen. Bei Robinie und Ulme dagegen sind stellenweise schwache Verschiebungen in den diagonalen Rinnen des Übergangs-Spätholzbereiches zu erkennen.

3.2.1.3 Elastizitätsmodul

In Tabelle 15 sind der Schwankungsbereich und Mittelwert des Elastizitätsmoduls für die klimatisierten tangentialen und radialen Querproben wiedergegeben. Hieraus ist zunächst ersichtlich, daß Pappel und Linde, wie bereits bei der Interpretation der Kraft-Weg-Diagramme angedeutet, durch einen relativ niedrigen Elastizitätsmodul gekennzeichnet sind. Die radialen Querproben zeigen insgesamt höhere Mittelwerte als die tangentialen Querproben.

Nach theoretischen Überlegungen wäre zu erwarten, daß ein diagonal-vernetzter Härteraster (z.B. der Pappel und Birke) als Federungssystem dient und somit eine hohe Elastizität (kleinen Elastizitätsmodul) der radialen Querproben bewirkt. Dagegen sollten radial orientierte Härterippen zwischen tangential verlaufenden Härtewellen (z.B. der Linde und Buche) als Festigkeitsträger fungieren, die zu einer höheren Widerstandsfähigkeit (hohem Elastizitätsmodul) der radialen Querproben führen.

Tab. 15: Bereich des Querdruck-Elastizitätsmoduls für die tangentialen (E_{Dt}) und radialen (E_{Dr}) Querproben und Anisotropiekoeffizient ($\epsilon = E_{Dr}/E_{Dt}$).
(n: Anzahl der Querproben; r_{12} : mittlere Rohdichte bei u = 12 %).

Holzarten	r_{12}	Tangentiale Proben		Radiale Proben		ϵ
		n	E_{Dt} [N/mm ²]	n	E_{Dr} [N/mm ²]	
Pappel	0,45	250	102...200...330	159	300...556... 784	2,8
Linde	0,51	114	118...272...494	99	327...510... 710	1,9
Ulme	0,61	31	281...385...438	22	413...649... 779	1,7
Robinie	0,61	15	518...652...750	11	630...736... 794	1,1
Birke	0,66	50	209...337...480	43	525...656... 786	2,0
Ahorn	0,67	178	324...534...777	107	738...997...1296	1,9
Buche	0,73	22	380...531...600	14	840...876... 931	1,6

Die in Tabelle 15 wiedergegebenen Elastizitätsmodule deuten aber auf umgekehrte Verhältnisse hin. So sind die radialen Querproben der Linde trotz höherer Rohdichte elastischer als diejenigen der Pappel. Ähnliches gilt für die radialen Querproben der Buche im Vergleich zu Ahorn. Ferner bewirkt die überwiegend tangential gerichtete Härtestruktur der Ulme keine Erhöhung der tangentialen Widerstandsfähigkeit.

Betrachtet man die aus den Mittelwerten errechneten Anisotropiekoeffizienten, zeigen Pappel und Birke die stärkste Anisotropie ($\epsilon = 2,8$ bzw. $2,0$). Die Vermutung, daß sich der diagonal-vernetzte Härteraster auf die Queranisotropie ausgleichend auswirken könnte, wird somit nicht bestätigt.

Zur Untersuchung des Verhaltens der Querproben mit verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf wurden Regressionsanalysen zwischen den ermittelten Elastizitätsmodulen und den entsprechenden Winkeln durchgeführt. Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Holzarten zu ermöglichen, wurde die Rohdichte in die Berechnung einbezogen, da zwischen Querdruck-Festigkeit bzw. -Elastizitätsmodul und Rohdichte ein starker Zusammenhang (F. KOLLMANN 1951; R. W. KENNEDY 1967) besteht. So wurde versucht, die Abhängigkeit des Quotienten "Elastizitätsmodul durch Rohdichte" (im Folgenden als "spezifischer Elastizitätsmodul" bezeichnet) mit der Variablen

"Winkel" zu erklären. In Abbildung 82 sind die ermittelten Regressionskurven einander gegenübergestellt.

Betrachtet man den Verlauf der für die zerstreutporigen Holzarten ermittelten Regressionskurven (Abb. 82a), zeichnen sich Linde und Buche durch eine mehr (Linde) oder weniger (Buche) ausgeprägte Einbuchtung der Kurve im tangential-nahen Winkelbereich ab. Die radial und tangential orientierte Härtestruktur scheint sich in dieser Richtung negativ auszuwirken.

Bei Pappel, Ahorn und Birke nimmt der spezifischer Elastizitätsmodul mit steigendem Winkel deutlich überproportional zu. Dadurch ergeben sich starke Unterschiede zwischen tangentialer und radialer Richtung. Bemerkenswert sind außerdem die relativ hohen Werte bei Pappel und Ahorn. Die Theorie einer federnden Wirkung des in radialer Richtung zusammengedrückten diagonal-vernetzten Härterasters kann hierdurch wiederum nicht bestätigt werden.

Bei Robinie und Ulme zeichnet sich der Einfluß des ringporigen Aufbaues durch die deutliche Einbuchtung der Kurve aus. Die tangentielle Struktur der Ulme läßt sich allerdings im Kurvenverlauf nicht erkennen. Zu erwähnen ist das ausgeglichene Verhalten der Robinie (vgl. Tab. 15), woraus sich aber ein Einfluß der Härtestruktur nicht herleiten läßt.

Den jeweiligen Holzarten entsprechend zeigen die im nassen Zustand zusammengedrückten Querproben ein ähnliches Verhalten.

3.2.1.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Durch die Analyse der Kraft-Weg-Diagramme sowie der Bruchstellen und -bilder wurde gezeigt, daß sich der Härteverlauf im Querschnittprofil der untersuchten Holzarten auf die Festigkeit und das elastische Verhalten der quer zur Faser zusammengedrückten diagonalen und radialen Querproben deutlich auswirkt. Dabei weisen die ringporigen Holzarten Robinie und Ulme trotz des relativ lockeren Frühholzes eine höhere radiale und diagonale Widerstandsfähigkeit als die zerstreutporigen Holzarten Pappel und Linde auf.

Ein eindeutiger Einfluß der Härtestruktur auf den in verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf ermittelten Elastizitätsmodul ist allgemein nicht zu erkennen. Lediglich Linde und Buche zeigen im tangential-nahen Winkelbereich eine Abnahme der Steifigkeit, die vermutlich auf die radial und tangential orientierte Härtestruktur zurückzuführen ist.

3.2.2 Quellung

Bekanntlich quillt dichtes, dickwandiges Holzgewebe stärker als ein lockerer, dünnwandiger Zellverband. Daher wäre zu erwarten, daß eine diagonal-vernetzte Härtestruktur ein ausgeglichenes Quellverhalten der Probenquerschnitte in den verschiedenen Richtungen bewirkt.

Bereits im normalklimatisierten Zustand ($u = 12\%$) deutet sich im allgemeinen die Queranisotropie der Quellung an. Zwischen Quellmaß und Quellrichtung besteht ein nahezu linearer Zusammenhang: Die Quellmaße nehmen mit steigendem Winkel zwischen tangentialer und radialer Richtung proportional ab. Hiervon abweichend zeichnen sich aber Linde und Robinie durch ein relativ ausgeglichenes Quellverhalten in den verschiedenen Richtungen aus.

Tab. 16: Bereich der maximalen radialen (α_r) und tangentialen (α_t) Quellmaße (r_0 : Darrdichte; ϵ : Anisotropiekoeffizient: α_t/α_r).

Holzarten	r_0 [g/cm ³]	n	α_t [%]	n	α_r [%]	ϵ
Pappel	0,43	43	8,3...10,3...11,6	89	1,7...2,7... 6,2	3,8
Ahorn	0,62	31	7,5...11,1...15,1	22	3,6...5,0... 8,4	2,2
Buche	0,67	17	11,8...13,1...14,1	11	6,2... 6,7... 7,2	2,0
Ulm	0,60	19	6,6...11,1...13,9	11	3,9...5,7... 9,9	1,9
Birke	0,61	4	10,7...13,0...15,0	15	6,3...7,6...11,3	1,7
Linde	0,49	51	7,1...11,4...15,1	58	5,0...7,1... 9,4	1,6
Robinie	0,66	7	5,0...6,4... 7,2	3	4,1...5,2... 5,4	1,2

Wie aus Tabelle 16 ersichtlich, zeigt die Pappel einen sehr hohen Anisotropiekoeffizient der maximalen Quellmaße, während sich Robinie und Linde durch eine nur schwache Anisotropie auszeichnen. Ähnlich wie bei der Querdruckfestigkeit ist auch bei der Quellung ein Einfluß verschieden orientierter Härtestrukturen nicht zu erkennen. Auch unter Berücksichtigung der Rohdichte - durch Bildung des Quotienten zwischen Quellmaß und Rohdichte - zeigen unterschiedliche Härtestrukturen ein ähnliches Verhalten in Abhängigkeit vom Winkel (Abb. 83).

4 DISKUSSION

4.1 Artspezifische Härtestrukturen

Aufbauend auf den Arbeiten von H. SCHULZ (1982, 1985) wurden ausgewählte einheimische und tropische Laubhölzer mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens untersucht. Dabei galt es zu überprüfen, ob die durch Sandstrahlbehandlung erzeugten Härtestrukturen bzw. ihre Anordnung oder Ausrichtung einen allgemein gültigen artspezifischen Charakter haben.

Durch den wiederholten Beschuß der gegen die Holzoberfläche geschleuderten Strahlmittelkörner werden offensichtlich die Zellwandschichten nach und nach aufgelockert, zerstört und schließlich abgerieben. Je nach Mächtigkeit der Zellwände wird folglich die Oberfläche selektiv punktuell abgetragen. Aus diesem Grund lehnte bereits F. KOLLMANN (1937) dieses Verfahren als Prüfmethode des Abnutzungswiderstandes des Holzes ab. H. SCHULZ (1982, 1985) erkannte aber, daß sich mit dieser Methode eindrucksvolle Härteprofile erzeugen lassen.

In ihrem Querschnittprofil weisen die untersuchten Holzarten deutliche artspezifische Härtestrukturen auf. Diese setzen sich aus Härterippen, -wellen und -bändern bzw. Rinnen, Gräben und Kratern zusammen, die je nach Holzart verschieden orientiert oder verknüpft sind. Dadurch konnte ein auf Merkmale der Querschnittprofile basierender Bestimmungsschlüssel für die untersuchten Holzarten aufgestellt werden.

Dagegen weisen die Radial- und Tangentialprofile, abgesehen von den strukturmitbestimmenden Spiegeln und Spindeln der Holzstrahlen, nur wenig Informationen hinsichtlich des anatomischen Holzaufbaues auf. Die Längsschnittebenen zeigen aber, daß sich die Härtestruktur des Querschnittprofils in die Längsrichtung fortsetzt, d.h. die Beschaffenheit des Querschnittprofils

als oberflächige Erscheinung läßt sich dreidimensional interpretieren.

Bei ausreichender Erfahrung in der Interpretation der entstehenden Querschnittprofile wird die makroskopische Holzbestimmung wesentlich erleichtert. Vor allem die zerstreutporigen Holzarten, die allgemein als wenig strukturiert gelten, sind nach den konventionellen Bestimmungsmethoden makroskopisch relativ schwer zu unterscheiden. Eine sichere Bestimmung des Pappel-, Weiden-, Roßkastanien-, Erlen-, Birken- oder Lindenholzes ist nur mit Hilfe von mehreren Unterscheidungsmerkmalen möglich. Anhand ihrer Querschnittprofile dagegen lassen sich diese Holzarten durch deutlich voneinander abweichende Härtestrukturen einfach bestimmen. Selbst innerhalb einer Gattung deuten sich Strukturunterschiede zwischen den Querschnittprofilen einzelner Arten an, die mikroskopisch nicht oder nur unsicher voneinander abzugrenzen sind (z.B. Aspe innerhalb der Gattung Pappel oder Schwarz- und Grauerle).

Zur anatomischen Interpretation der Härtestrukturen wurden die Querschnittprofile mit zugehörigen Mikroquerschnitten verglichen. Für viele der untersuchten Hölzer konnten so die Härteraster durch Merkmale des anatomischen Aufbaues erklärt werden.

Dabei wurde der besondere Einfluß der Anordnung der weitleumigen wasserleitenden Zellelemente und des Längsparenchyms nachgewiesen. Die Gefäße stellen innerhalb des Grundgewebes relativ breite Angriffsflächen für den Sandstrahl dar. Das Längsparenchym wird bei gehäuftem Vorkommen - wie z.B. in vielen Tropenhölzern - wegen der dünnwandigen Zellen selektiv stärker abgerieben als das in der Regel dichtere Grundgewebe.

Somit stellt die Härtestruktur im Spätholz der ringporigen Holzarten die arttypische, allgemein bekannte Anordnung der wasserleitenden Elemente und des Längsparenchyms dar. Gleiches gilt für die Tropenhölzer, in denen das artspezifisch angeordnete Längsparenchym zusammen mit den weitleumigen Gefäßen die Härtestruktur des Querschnittprofils bestimmt.

Bei den zerstreutporigen und halbringporigen Holzarten dagegen konnte eine geordnete Härtestruktur festgestellt werden, obwohl diese keine derartige, makroskopisch wie auch mikroskopisch augenfällige anatomische Struktur aufweisen. So werden das Längsparenchym in der Regel als zerstreut angeordnet bzw. wenig ausgebildet, die Gefäße und Gefäßgruppen als einzeln oder in Nestern und Gruppen ebenfalls zerstreut verteilt beschrieben.

Aufgrund ihrer geordneten Härtestruktur konnte jedoch in überraschend vielen Holzarten eine bislang kaum erkannte, übergeordnete Anordnung der einzelnen Gefäße und Gefäßgruppen nachgewiesen werden. So zeichnen sich Pappel, Weide und Birke, teilweise auch Erle, Hainbuche, Kirschbaum und Nußbaum, wie auch zahlreiche Tropenhölzer, durch eine diagonale Gefäßanordnung aus. In den mikroskopischen Präparaten ist eine derartige Anordnung nicht deutlich zu erkennen und wurde deshalb von den Holzanatomen meistens übersehen.

Die Entstehung einer durchgehenden Härtestruktur aus einzeln verteilten Gefäßen und Gefäßgruppen bedarf in diesem Zusammenhang einer weiteren Erklärung. Aus Gefäßnestern und -gruppen entstehen zunächst durch Abrieb der intervaskulären Wandungen Krater bzw. kurze Rinnen. Durch die weitere Wirkung der Strahlkörner werden die Fasern, die die Gefäße unmittelbar umsäumen, angegriffen. Die einzelnen Gefäße, Gefäßenster und -gruppen werden somit erweitert. Dadurch werden die schmalen Grundgewebestreifen abgerieben, die benachbarte Gefäße oder Gefäßgruppen voneinander trennen. Es entstehen somit der Anordnung der einzelnen Gefäße und Gefäßgruppen entsprechend verschieden orientierte, durchgehende Rinnen. Für die entstehenden Härtestrukturen sind einerseits der Gruppierungsgrad der Gefäße, andererseits die Wandigkeit des Grundgewebes von entscheidender Bedeutung. Das Ausmaß der Erweiterung der Gefäße und Gefäßgruppen ist von der Wandigkeit des Grundgewebes abhängig. Dies zeigt der Vergleich des diagonal-vernetzten Härterasters der Birke mit der Kraterstruktur des Ahorns, bei dem die Gefäßscheiden aus dickwandigen Libriformfasern eine Erweiterung der Gefäße zu Rinnen verhindern.

Als Ursache der Entstehung von Rinnen und Kratern wurde vermutet, daß das intervaskuläre bzw. vazizentrische Grundgewebe zusammen mit den Gefäßen zu einem Hydrosystem gehört und somit aus weitleumigen, dünnwandigen, wasserleitend fähigen Zellelementen besteht. Jedoch konnten weder im Lignifizierungsgrad der Zellwände noch in der Wanddicke und Lumenbreite der Fasern Unterschiede zum übrigen Grundgewebe festgestellt werden. Streng genommen treten somit bei der Entstehung der Härtestrukturen Artefakte auf. Deshalb kann das Rinnen- bzw. Kratersystem der zerstreutporigen und halbringporigen Hölzer nicht als Hydrosystem im Sinne von H.J. BRAUN (1980) bezeichnet werden.

Zusammenfassend kann man die Wirkung des Sandstrahles auf die Holzoberfläche mit der eines "optischen Verstärkers" der anatomischen Struktur vergleichen, d.h. die Anordnung der einzelnen Zellelemente untereinander wird ihrer Abriebfestigkeit entsprechend reliefartig und somit makroskopisch deutlich erkennbar dargestellt.

4.2 Härteverlauf

Mit Hilfe der Sandstrahlmethode stellte H. SCHULZ (1985) fest, daß die Jahrringgrenze in zerstreutporigen Laubhölzern mit härteren oder weicheren Holzschichten nicht immer in Einklang gebracht werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb versucht, durch Beschreibung und Interpretation des Härteverlaufes im Querschnittprofil verschiedener - vor allem zerstreutporiger - Laubhölzer den Jahrringaufbau zu charakterisieren.

Dabei muß aber berücksichtigt werden, daß sich die erzielten Ergebnisse auf ein zahlenmäßig beschränktes Probenkollektiv stützen. In erster Linie galt es, die Variabilität des Härteverlaufes im Vergleich zu den theoretischen Vorstellungen des Jahrringaufbaues darzustellen, ohne auf die Vielzahl der Einflußfaktoren (z.B. standörtliche oder klimatische Bedingungen; F.H. SCHWEINGRUBER 1983) einzugehen.

Es wurde zunächst bewiesen, daß Härteverlauf und Verlauf der Rohdichte innerhalb des Jahrringes eng korreliert ($r = 0,86$) sind: Schwankungen des Härteverlaufes werden zu 74 % durch Änderungen der Rohdichte erklärt. Somit sind Härteschwankungen auf Änderungen des Zellwandanteils zurückzuführen, die sich innerhalb des Jahrringes in erster Linie aus Schwankungen des Gefäßflächenanteils (Gefäßgröße und/oder -häufigkeit), aber auch aus Änderungen in der Wanddicke und/oder Lumenbreite des Grundgewebes ergeben.

Aufgrund der Größenänderung und Verteilung der Gefäße innerhalb des Jahrringes lassen sich die Laubhölzer in drei Gruppen einteilen, die von der I.A.W.A. (L. CHALK et al. 1964) folgendermaßen definiert sind:

"Ringporiges Holz: Holz, in welchem die Poren des Frühholzes bedeutend grösser sind als jene des Spätholzes und gut definierte Zonen oder Ringe bilden.

Zerstreutporiges Holz: Holz, in welchem alle Poren ungefähr gleich groß sind oder sich in ihrer Grösse nur wenig voneinander unterscheiden und gleichmäßig über den ganzen Jahrring verteilt sind.

Halbringporiges Holz: Holz, in welchem das Frühholz charakterisiert ist durch eine Zone, in der (a) gelegentlich etwas grössere Gefäße oder (b) viele kleine Gefäße vorkommen."

Während der Härteverlauf und somit der Jahrringaufbau der untersuchten Ringporer und Halbringporer der I.A.W.A.-Definition entspricht, ist hinsichtlich der Gefäßverteilung im Jahrring der zerstreutporigen Hölzer die Übereinstimmung mit dem jeweils beschriebenen Härteverlauf nicht immer gegeben. Dieser erwies sich sogar als sehr komplex und differenziert. Es wurden unter den untersuchten zerstreutporigen Holzarten zwei typische Grundformen des Härteverlaufes beschrieben.

Der Härteverlauf vom Grundtyp Pappel zeigt eine Differenzierung des Jahrringes in ein weiches Frühholz und ein härteres Spätholz. Dieser charakterisiert im allgemeinen den Aufbau der adulten Jahrringe der Pappel, Weide, Erle, Linde, Gemeinen Hasel und Buche. Er

gilt aber generell auch für die marknahen Jahrringe aller untersuchten zerstreutporigen Hölzer. Der stärkere Abrieb der Frühholz-zonen ist auf den im Vergleich zum Spätholz höheren Gefäßflächen-anteil zurückzuführen und nicht auf Unterschiede der Wanddicke des Grundgewebes. Wie Untersuchungen von H. SUSS u. W.R. MÜLLER-STOLL (1970) zeigen, ändert sich bei Pappel die Zellwanddicke der Fasern vom Früh- zum Spätholz nur wenig, und kann sogar im Spätholz geringer als im Frühholz sein. Bei Buche ist erst im letzten Spätholz eine Zunahme der Zellwanddicke zu verzeichnen. Folglich müßte der Härteverlauf vom Grundtyp Pappel als halbringporig bezeichnet werden.

Auf die Problematik der Zuordnung mancher Holzarten zur Gruppe der Zerstreutporer (nach obiger Definition) weisen zahlreiche, vor allem an Buche durchgeführte, anatomische Untersuchungen hin (z.B. H. SCHULZ 1957; W. KNIGGE u. H. SCHULZ 1961; H.H. BOSSHARD u. M. BARISKA 1970; H. SUSS et al. 1978). Sie zeigen, daß im Jahrring der Buche die Gefäßdichte, der Gefäßdurchmesser und vor allem -anteil in Richtung Spätholz stark abnehmen. Darüber hinaus deutet sich bei Buche unter prekärem Wasserangebot eine Tendenz zur Halbringporigkeit an (W. KNIGGE u. H. SCHULZ 1961; H.H. BOSSHARD u. L. KUČERA 1973). Nach A. BONNEMANN (1975) kann auch Pappel gelegentlich Ansätze zu Halbringporigkeit aufweisen.

Der Grundtyp Birke zeigt im Vergleich zum Grundtyp Pappel einen gleichmäßigeren Härteverlauf. Die Jahrringe sind deshalb nicht bzw. nur schwach markiert. Dieser Härteverlauf ist für die adulten Jahrringe des Ahorns, der Birke, Roßkastanie und Hainbuche charakteristisch.

Dieser gleichmäßige Härteverlauf entspricht obiger Definition. Jedoch läßt sich dadurch die allgemeine Vorstellung eines porösen Frühholzes und dichten Spätholzes (L. CHALK et al. 1964) in Frage stellen. Daß diese Begriffe nicht immer zutreffend sind, beweist der Härteverlauf vieler Jahrringe der Birke, wobei das Übergangsholz weicher erscheint als das Früh- und Spätholz. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Gefäßflächenanteil (Häufigkeit und Durchmesser) den höchsten Wert erst im Übergangsholz erreicht, während die Früh- und Spätholzzonen gefäßarm sind. Gleichfalls bei Birke

konnten sogar Jahrringe beobachtet werden, die im Anschluß an die Jahrringgrenze ein dichtes, gefäßarmes Gewebe (Härteband) bilden.

H.H. BOSSHARD (1974) erkannte die Problematik dieser Begriffe, die nur auf die Nadelhölzer und ringporigen Laubhölzer zutreffen. Deshalb schlug er stattdessen die Begriffe Anfangs- und Endzone vor, die "nur die zeitliche Folge der Jahrringanlage und nicht eine kalendarische Abgrenzung" implizieren (H.H. BOSSHARD u. L. KUČERA 1973). Dies wurde in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt, indem den Begriffen Früh-, Übergangs- und Spätholz eine rein räumliche Bedeutung zugewiesen wurde. Der mit diesen Begriffen oft verbundene funktionelle und strukturelle Sinn hat keine allgemeine Gültigkeit und muß deshalb für die zerstreutporigen Hölzer relativiert werden.

Der Jahrringaufbau der jugendlichen Jahrringe der zerstreutporigen Holzarten wurde dem Härteverlauf (Grundtyp Pappel) entsprechend als halbringporig bezeichnet. Zudem zeigt der Härteverlauf innerhalb des marknahen Bereiches eine insgesamt leichte Zunahme nach außen hin, d.h. die Rohdichte nimmt innerhalb des jugendlichen Holzes mit der Entfernung vom Mark allmählich zu.

B.J. RENDLE (1960) bezeichnet jugendliches Holz (juvenile wood) als die Wachstumsperiode, in der eine progressive Zunahme der Zelldimensionen und eine Änderung der Form, Struktur und Verteilung der Zellen stattfinden. Das jugendliche Holz der zerstreutporigen Hölzer zeichnet sich allgemein durch hohe Gefäßhäufigkeit, kleine Gefäßdurchmesser und geringe Rohdichte aus (H.E. DESCH 1932: Birke; K.-H. MEYER-UHLENRIED 1957: Pappel; K. FUKASAWA 1984: Birke und Linde). Generell weist jugendliches Holz schlechte physikalische Eigenschaften, wie niedrige Festigkeit und hohe Längsschwindung, auf (J.D. BRAZIER 1985). Deshalb ist man bemüht, eine Methode zur Identifizierung des jugendlichen Holzes zu finden.

Mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens konnte in den untersuchten Birkenproben aufgrund des Härteverlaufes jugendliches Holz von adultem Holz abgegrenzt werden. In den anderen Hölzern vom Grundtyp Birke, wie Ahorn und Hainbuche, ist diese Abgrenzung allerdings schwierig, da der Übergang zwischen den beiden Bereichen fließend verläuft.

Allgemein sind jugendliche Jahrringe im Vergleich zu später angelegten Jahrringen durch einen feiner strukturierten Härteraster gekennzeichnet, der auf die hohe Häufigkeit der relativ kleinen Gefäße zurückzuführen ist. Hierbei ist der Übergang zum adulten Holz fließend.

Der Jahrring-Härteverlauf der zerstreutporigen Holzarten ist vielfach durch kurzweilige Härteschwankungen gekennzeichnet. Diese stellen intraannuelle Dichteschwankungen dar, die als Verdichtungs- (geringer Gefäßflächenanteil und/oder dickwandiges Grundgewebe) oder Auflockerungs- (hoher Gefäßflächenanteil und/oder dünnwandiges Grundgewebe) an verschiedensten Stellen im Jahrring auftreten. Im Extremfall ergeben sich Jahrringgrenzen-ähnliche Schwankungen (falsche Jahrringe).

Im Gegensatz zu den umfangreichen, an Nadelholz durchgeführten Untersuchungen von F.H. SCHWEINGRUBER (1980) liegen über das Vorkommen derartiger Dichteunregelmäßigkeiten in Laubhölzern nur spärliche Angaben in der Literatur vor. So berichten W. ELLING (1965) und M.L. PARKER et al. (1978) von in Erlenholz häufig vorkommenden "Doppelringen" oder "falschen Jahrringgrenzen". In Pappelholz entdeckte K.-H. MEYER-UHLENRIED (1957) Stellen innerhalb eines Jahrringes, die nur Holzfasern und vereinzelte, englumige Tracheen enthalten. Ebenfalls an Pappelholz beobachteten V. NEČESANÝ u. J. CETLOVÁ (1969) "Makroskopisch deutliche Streifen im Holz, die streng parallel mit den Jahrringgrenzen verlaufen". Sie stellten dann fest, daß hellere Streifen mit einem höheren Gefäßanteil, dunklere Streifen dagegen mit einer Vermehrung von mechanischem Gewebe verbunden waren.

H. SCHULZ (1985) machte aber mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens deutlich, daß tangentielle Wellen keine seltenen Erscheinungen im Härteprofil der zerstreutporigen Holzarten sind. Besonders häufig sind sie in breiten (Ahorn, Birke und Linde) und in marknahen Jahrringen (Aspe) zu finden. Diese auf einzelnen Beobachtungen basierende Aussage wird durch die vorliegende Untersuchung bestätigt: Abgesehen von wenigen Proben besteht zwischen Häufigkeit der Härtewellen und Jahrringbreite eine gesicherte positive Beziehung und jugendliche Jahrringe zählen mehr Härtewellen als adulte Jahrringe. Es wurde an zwei Probestämmen außerdem festgestellt, daß die Häufigkeit der Härtewellen mit steigender Höhe im Stamm, vor allem innerhalb des Kronenbereiches, zunimmt. Somit stimmen die an zertreutporigen Laubhölzern erzielten Ergebnisse mit den von F.H. SCHWEINGRUBER (1980) für Nadelholz gefundenen Verhältnissen überein.

In den untersuchten Querschnittprofilen der Erle, Pappel und Birke kommen Härtewellen häufig in Zusammenhang mit Markflecken vor. Sie können aber auch als seitliche und axiale Fortsetzung von Verletzungsstellen auftreten. W. ELLING (1966) beobachtete derartige Verdichtungen in Jahrringen der Schwarzerle. Er bezeichnete sie als falsche Jahrringgrenzen, indem er schrieb: "In der Umgebung der Fraßgänge der Larven bildet der Baum - offenbar durch schlechtere Versorgung des Kambiums infolge der Verwundung und ihrer Heilung - häufig mehrere Lagen flacher Faserzellen; diese sehen den als Abschluß des Jahresrings gebildeten manchmal täuschend ähnlich, ...". Falsche Jahrringgrenzen können auch, wie an verschiedenen zerstreutporigen Hölzern festgestellt, im Zusammenhang mit Stammverletzungen entstehen, die während der Vegetationsperiode erfolgt sind (G. LESNINO 1985).

Hinsichtlich der auslösenden Faktoren, die zu Unregelmäßigkeiten im Jahrringaufbau führen können, sind zahlreiche Theorien entstanden, die meistens auf exogene Einflüsse, wie plötzliche Veränderungen der standörtlichen Bedingungen, hindeuten. Falsche Jahrringe, d.h. erneute Bildung von weitlumigen Zellelementen im Spätholz, sind auf extremen Standorten häufiger zu beobachten (H.H. BOSSHARD 1974). Sie werden auch in Zusammenhang mit

Johannistriebbildung, erneutem Austrieb von Blättern und Blüten am Ende der Vegetationsperiode oder Wiederaustrieb nach Kahlfraß gebracht (H.H. BOSSHARD 1974; P. SCHUTT u. W. KOCH 1978). Diese physiologischen Vorgänge sind von komplexer Natur und von zahlreichen Faktoren abhängig, deren eingehende Analyse den Rahmen dieser Abhandlung sprengen würde.

Es ist aber vorstellbar, daß Härtewellen und Härtebänder, die Verdichtungszone im Holzgewebe entsprechen, zur Stabilität des Baumes beitragen. Vor allem in den jugendlichen Jahrringen, die in den zerstreutporigen Hölzern durch ein lockeres Gewebe gekennzeichnet sind, könnten sie bei vermehrtem Vorkommen ein wichtiges Element der Biegefestigkeit oder Elastizität von Wipfeltrieben (H. SCHULZ 1985) darstellen.

Härtewellen können auch, wie an Pappel, Weide, Ahorn und Hainbuche festgestellt, auf intensive Reaktionsholzbildung zurückgeführt werden. Diese Zugholz-Härtewellen lassen sich in der Regel anhand ihrer gröberen (Pappel, Weide) bzw. kompakten (Ahorn, Hainbuche) Oberflächenstruktur erkennen. Im Gegensatz zur Identifizierung von Druckholz in Nadelbäumen ist die makroskopische Bestimmung von Zugholz in Laubbäumen selbst mit Färbemethoden (H. SACHSSE 1965) äußerst schwierig. Ein sicherer Nachweis von Zugholz war daher ausschließlich durch Anfertigung von Mikroschnitten und deren Anfärbung (H. SACHSSE 1965; H. v. AUFSESS 1973) möglich. Mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens läßt sich jedoch intensive Zugholzbildung makroskopisch auf relativ einfache Art nachweisen.

4.3 Holzeigenschaften

Anhand von Querdruck- und Quellungsversuchen in verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf sollte eine mögliche Einwirkung der Härtestrukturen auf die Queranisotropie der Festigkeit und Elastizität bzw. Quellung nachgeprüft werden. Hinsichtlich der Steifigkeit, Elastizität und Quellverhalten der Holzproben hat sich zwischen dem diagonal-vernetzten Härteraster (Pappel und Birke) und der radial-tangentialen Härtestruktur (Linde und Buche) kein deutlicher Unterschied ergeben, der auf die Orientierung der Härtestrukturen zurückzuführen wäre. Es hat sich aber gezeigt, daß

der Härteverlauf im Jahrring das plastische Verhalten der zusammengedrückten radialen und diagonalen Querproben stark beeinflusst.

Die Frage der Queranisotropie der Holzeigenschaften hat viele Holzforscher beschäftigt und wurde in zahlreichen Untersuchungen behandelt. Betrachtet man die in der Literatur angegebenen Werte der Querfestigkeit und linearen Quell- bzw. Schwindmaße, sind für die jeweiligen Hölzer erhebliche Schwankungen zwischen den verschiedenen Angaben zu verzeichnen. KOLLMANN (1951) gibt z.B. folgende Schwindmaße für Birke ($\rho_0 = 0,61 \text{ g/cm}^3$) an: $\beta_r = 5,3 \%$, $\beta_t = 7,8 \%$, die, als Quellmaße umgerechnet (nach R. TRENDELENBURG 1939), Werte von $\alpha_r = 5,6 \%$ und $\alpha_t = 8,5 \%$ ergeben. An Birkenproben der mittleren Rohdichte von $0,62 \text{ g/cm}^3$ ermitteln D. NOACK et al. (1973) Quellmaße von $\alpha_r = 8 \%$ und $\alpha_t = 12 \%$. Dies zeigt die Problematik dieser Prüfungen, wobei in erster Linie die Probenausformung (L. VORREITER 1955), die Rohdichte (R. KEYLWERTH 1951) und der Jahrringaufbau (F. KOLLMANN 1960) zu berücksichtigen sind.

Über die Ursachen der Queranisotropie wurden verschiedene Theorien aufgestellt. Die Wirkung der Holzstrahlen als Versteifungselemente bei der radialen Querdruckfestigkeit sowie als bremsende Elemente bei der radialen Quellung wird häufig vermutet (Querdruckfestigkeit: A. FREY-WYSSLING u. F. STUSSI 1948; F. KOLLMANN 1960; R.W. KENNEDY 1968; Quellung: R. KEYLWERTH 1951; D.C. McINTOSH 1955a, 1955b; A.P. SCHNIEWIND 1959). Andere Hypothesen vermuten den Zellwandaufbau als wichtigsten Faktor der Queranisotropie insbesondere der Quellung bzw. Schwindung. Hierbei werden zwischen radialen und tangentialen Zellwänden Unterschiede in der Orientierung der Mikrofibrillen (R. TRENDELENBURG 1939), in der Mächtigkeit der Mittelschicht (A. FREY-WYSSLING 1943) oder Lignifizierungsgrad der Mittellamelle (H.H. BOSSHARD 1956) genannt.

Die durchgeführte Prüfung der Querfestigkeit und Quellung sollte die Festigkeitsfunktion der Härtestrukturen erklären. Dies stellte aber voraus, daß die durch den Sandstrahl erzeugten Strukturen einem dreidimensionalen zusammenhängenden anatomischen System entsprechen. Wie oben aber gezeigt wurde, weisen die Härte-

strukturen Artefakte auf. Die Deutung des Härtesystems aus Rippen und Wellen als Statiksystem wie auch des Rinnen- und Kratersystems als Hydrosystem erscheint somit fraglich.

4.4 Bedeutung des Sandstrahlverfahrens für die Holzforschung

Seit langem ist man in der Holzforschung bemüht, geeignete Verfahren zur Ermittlung von Änderungen des Holzgefüges zu entwickeln. Die Jahrringanalyse kann zunächst als Hilfsmittel der Beurteilung der Holzgüte im Bereich der Holzverwendung angesetzt werden, wo starke Schwankungen in der Jahrringstruktur unerwünscht sind. Mit Hilfe der Jahrringanalyse wird auch versucht, mögliche Zusammenhänge zwischen Jahrringaufbau und klimatischen Bedingungen oder standörtlichen Veränderungen (infolge von z.B. Düngung, Durchforstung, Immissionen) zu erkennen. Neben der Jahrringbreite wird auch die maximale oder minimale Rohdichte im Jahrring als Weiserelement zur Jahrringdatierung in der Dendrochronologie herangezogen (F.H. SCHWEINGRUBER 1983).

Alte wie neuere Methoden der Jahrringanalyse basieren dabei auf die indirekte Ermittlung bzw. Schätzung des intraannuellen Rohdichteverlaufes: Photometrische Methode (W. MÜLLER-STOLL 1947, 1949), Härtetaster-Methode (H. MAYER-WEDELIN 1951; J.E. MARIAN u. D.A. STUMBO 1960; H. SACHSSE 1960), Schwefelsäure-Korrosions-Verfahren (J. KISSER u. I. LEHNERT 1951), Planimetrie (J.L. LADELL 1959), Bildanalyse-Verfahren (H. SACHSSE 1984) und Röntgendensitometrie (H. POLGE 1978; J.-Ch. FERRAND 1982).

Die aufgeführten Methoden sind entweder zeitaufwendig oder verlangen größte Sorgfalt bei der Ausformung und Behandlung der Proben oder bedienen sich kostspieliger Geräte. Das Sandstrahlverfahren könnte unter genau definierten Strahlbedingungen und mit dem Einsatz des berührungslosen Laser-Abstand-Meßverfahrens, das eine elektronische Weiterverarbeitung der Meßdaten ermöglicht, als schnelle und einfache Methode der Jahrringanalyse Anwendung finden.

Aufgrund der "strukturverstärkenden" Wirkung des Sandstrahlens bietet sich schließlich die Möglichkeit, anatomische Strukturen wie bestimmte Anordnungssysteme der Gefäße relativ unabhängig von der Probengröße makroskopisch zu analysieren. Dadurch könnten strukturierte Systeme im Gegensatz zur mikroskopischen Untersuchung weiträumig erfaßt werden. Die komplexen Zusammenhänge zwischen strukturierten Systemen und physiologischen Funktionen ließen sich unter diesem neuen Aspekt möglicherweise besser erläutern.

Auf die Problematik, die Natur in funktionale Ordnungssysteme gliedern zu wollen, weist aber H.H. BOSSHARD (1974) hin: "Die Betrachtungen der beschreibenden und vergleichenden Holzanatomie könnten zu einem schematisierenden Denken verleiten. Das Reflektieren in Kategorien der Strukturordnung ist ein sinnvolles, aber abstraktes Hilfsmittel, um sich in der Kontinuität der Entwicklung zurechtzufinden. In der Natur sind Strukturen nie losgelöst von Funktionen; es besteht vielmehr eine innere, gegenseitige Abhängigkeit, die wohl zum Wesen des Harmonischen gehört, es selber ausmacht und prägt. Dieser Zusammenhang darf beim Studium der Holzstrukturen nicht vernachlässigt werden."

5. ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe des Sandstrahlverfahrens wurden ausgewählte Laubhölzer der gemäßigten und tropischen Zone auf ihre Härtestrukturen untersucht. Dabei galt es, artspezifische Härtemuster und das Verhalten des Härteverlaufes innerhalb des Jahrringes bzw. - sofern vorhanden - der Zuwachszone zu charakterisieren. Darüber hinaus sollte ein möglicher Einfluß der beschriebenen Härtestrukturen auf bestimmte Holzeigenschaften geprüft werden.

Unter definierten Bedingungen wurden verschieden ausgeformte Holzproben in ihrer Quer-, Radial- und Tangentialschnittebene sandbestrahlt. Die durch Abrieb entstandenen Härteprofile wurden beschrieben und ihre Struktur durch Vergleich mit dem anatomischen Aufbau zugehöriger Mikroschnitte interpretiert. An ausgewählten zerstreutporigen Holzarten wurden der Härteverlauf im Jahrring sowie das Vorkommen von intraannuellen Dichteschwankungen systematisch analysiert. Zur Überprüfung der Hypothese einer Einwirkung der Härtestrukturen auf die Holzeigenschaften wurde das Verhalten von Proben mit unterschiedlich orientierten Härtestrukturen anhand von Querdruck- und Quellungsversuchen in verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf verglichen.

Die erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Härteverlauf im Jahrring

Der Härteverlauf im Jahrring ringporiger und halbringporiger Holzarten entspricht jeweils dem bekannten anatomischen Jahrringaufbau dieser Hölzer. Demgegenüber zeichnet sich der Härteverlauf zerstreutporiger Laubhölzer, die allgemein als gleichmäßig aufgebaut gelten, durch eine überraschend hohe Variabilität aus.

Es konnten zwei verschiedene Grundtypen des Härteverlaufes im Jahrring unterschieden werden. Beim Grundtyp Pappel sind die Jahrringe durch einen Härteabfall zwischen aufeinanderfolgendem Spät- und Frühholz deutlich abgesetzt und zeigen einen halbringporig-ähnlichen Härteverlauf. Hierdurch sind die marknahen, jugendlichen Jahrringe aller untersuchten zerstreutporigen Holzarten sowie in der Regel die adulten Jahrringe der Buche, Erle, Gemeinen Hasel, Linde, Pappel und Weide charakterisiert. Beim Grundtyp Birke ist der Härteverlauf dagegen gleichmäßiger und weniger stark zwischen Früh- und Spätholz differenziert. Dadurch sind die Jahrringgrenzen schwer zu erkennen. Dieser Grundtyp gilt allgemein für die adulten Jahrringe des Ahorns, der Birke, Hainbuche und Roßkastanie. Er wird als zerstreutporig im engeren Sinn bezeichnet.

Durch den unterschiedlichen Härteverlauf der jugendlichen und adulten Jahrringe läßt sich bei Birke der Bereich des jugendlichen Holzes deutlich abgrenzen.

Durch Sandstrahlbehandlung des Querschnittes läßt sich auf einfache Weise intensive Reaktionsholzbildung aufgrund von typischen Abweichungen im Härteverlauf und in der Oberflächenstruktur identifizieren. In diesem Zusammenhang konnte eine mögliche, bisher unbekannte Form der Reaktionsholzbildung bei Linde festgestellt werden.

Die untersuchten zerstreutporigen Laubhölzer weisen überraschend viele intraannuelle Dichteschwankungen auf. Dabei steigt meistens die Häufigkeit der Dichteschwankungen mit zunehmender Jahrringbreite. In marknahen Jahrringen ist die Häufigkeit der Dichteschwankungen meistens deutlich höher als in markfernen Jahrringen. Am Beispiel von zwei Pappelstämmen wurde zudem gezeigt, daß mit steigender Höhe im Stamm die relative Häufigkeit der Dichteschwankungen leicht zunimmt, während ein Einfluß der Himmelsrichtung nicht nachzuweisen ist.

Nach systematischer Erfassung der Lage der Jahrringgrenze im Härteprofil ergab sich, daß sich die Jahrringgrenze vor allem im adulten Bereich der Holzarten vom Grundtyp Birke nicht immer an die härteste Holzschicht im Jahrring anschließt.

2. Artspezifische Härtestrukturen

Durch Sandstrahlbehandlung von Holzprobenquerschnitten entstehen infolge des selektiv punktuellen Abriebs makroskopisch erkennbar arttypische Härtestrukturen. Diese lassen sich in der Regel durch anatomische Strukturen erklären, die jedoch bislang wenig berücksichtigt wurden, da sie mikroskopisch kaum in Erscheinung treten. Der Sandstrahl wirkt somit als "optischer Verstärker" der anatomischen Struktur. Dadurch konnte ein auf Härtestrukturen basierender Bestimmungsschlüssel aufgestellt werden, der vor allem die makroskopische Unterscheidung der zumeist wenig strukturierten einheimischen zerstreutporigen Laubhölzer erleichtert.

Durch die Interpretation der Härtestrukturen konnte in überraschend vielen einheimischen und tropischen zerstreutporigen Laubhölzern eine bislang kaum erkannte übergeordnete diagonale Anordnung der Gefäße, Gefäßgruppen oder -nester festgestellt werden.

3. Einfluß der Härtestrukturen auf die Holzeigenschaften

Der Härteverlauf im Jahrring wirkt sich bei Querdruckbelastung senkrecht und schräg zum Jahrringverlauf im Bereich der plastischen Deformationen deutlich aus. Ein eindeutiger Einfluß unterschiedlich orientierter Härtestrukturen auf die in verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf ermittelten Querdruck-Elastizitätsmodule und linearen Quellmaße ist jedoch nicht zu erkennen.

In der Diskussion werden u. a. Anwendungsmöglichkeiten des Sandstrahlverfahrens in der Holzforschung erläutert. Insbesondere im Bereich der Jahrringanalyse könnte sich das Sandstrahlen in Kombination mit dem berührungslosen Laser-Meßverfahren als schnelle und komfortable Methode erweisen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Anonymus (1939): Holzeigenschaftstafeln: Rotbuche. Holz Roh-Werkst. 2, 2 (95-96).
- Anonymus (1942): Holzeigenschaftstafeln: Bergahorn. Holz Roh-Werkst. 5, 6 (223-224).
- Anonymus (1943 a): Holzeigenschaftstafeln: Platane. Holz Roh-Werkst. 6, 7 (219-220).
- Anonymus (1943 b): Holzeigenschaftstafeln: Roßkastanie. Holz Roh-Werkst. 6, 8/9 (259-260).
- Anonymus (1966): Strahlverfahrenstechnik - Begriffe -. DIN 8200, Deutscher Normenausschuß.
- Anonymus (1975): Klimate und ihre technische Anwendung; Normalklimate. DIN 50 014, Deutscher Normenausschuß.
- Anonymus (1979 a): Bestimmung der Quellung und Schwindung. DIN 52 184, Deutscher Normenausschuß.
- Anonymus (1979 b): Druckversuch quer zur Faserrichtung. DIN 52 192, Deutscher Normenausschuß.
- AUFSESS H. v. (1973): Mikroskopische Darstellung des Verholzungsgrades durch Färbemethoden. Holz Roh-Werkst. 31 (24-33).
- BODIG J. (1965): The Effect of Anatomy on the Initial Stress-Strain Relationship in Transverse Compression. For. Prod. J. 15 (197-202).
- BONNEMANN A. (1975): Einige kennzeichnende Eigenschaften des Pappelholzes. Die Holzzucht 29, 2/4 (17-22).
- BONNEMANN A. (1979, 1980): Eigenschaften des Pappelholzes. Sonderdruck aus Holz-Zentralbl. 24, 41, 57, 117, 120, 128/1979; 14, 15/1980.
- BOSSHARD H. H. (1956): Über die Anisotropie der Holzschwindung. Holz Roh-Werkst. 14, 8 (286-295).
- BOSSHARD H. H. (1974): Holzkunde I. Basel und Stuttgart: Birkhäuser Verlag.
- BOSSHARD H. H. (1976): Jahrringe und Jahrringbrücken. Schweiz. Z. f. Forstw. 10 (675-693).
- BOSSHARD H. H. und BARISKA M. (1970): Statistische Gewebeanalyse, dargestellt an Buche (*Fagus silvatica* L.). Holzforschung 24, 1 (1-4).

- BOSSHARD H. H. und KUČERA L. (1973): Über Anfangs- und Endzonen der Jahrringe. Holz Roh-Werkst. 31 (484-486).
- BRAUN H. J. (1980): Bau und Leben der Bäume. Freiburg i. Brsg.: Rombach.
- BRAUN H. J. (1982): Lehrbuch der Forstbotanik. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag.
- BRAZIER J. D. (1985): Juvenile Wood. In: Xylorama. Tendenzen in der Holzforschung. Ed. L.J. KUČERA. Basel, Boston, Stuttgart: Birkhäuser Verlag.
- BRAZIER J. D. und FRANKLIN G. L. (1961): Identification of Hardwoods. For. Prod. Res. Bull. No. 46. London: H. M. Stationery Office.
- CHALK L., HUBER B., NORMAND D., PHILLIPS E. W. J. und RENDLE B. J. (1964): Multilingual Glossary of Terms used in Wood Anatomy. Committee on Nomenclature Internat. Association of Wood Anatomists. Winterthur: Verlagsanstalt Buchdruckerei Konkordia.
- DADSWELL H. E. (1958): Wood Structure Variations occurring during tree Growth and their Influence on Properties. J. of the Inst. of Wood Sci. 1 (11-33).
- DESCH H. E. (1932): Anatomical Variation in the Wood of some dicotyledonous Trees. The New Phytologist XXXI, 2 (73-118).
- ELLING W. (1966): Untersuchungen über das Jahrringverhalten der Schwarzerle. Flora, Abt B, 156 (155-201).
- FERRAND J.-Ch. (1982): Réflexions sur la Densité du Bois. Holzforschung 36, 2 (99-105) / 3 (153-157) / 4 (191-196).
- FREY-WYSSLING A. (1943): Weitere Untersuchungen über die Schwindungsanisotropie des Holzes. Holz Roh-Werkst. 6, 7 (197-198).
- FREY-WYSSLING A. und STÜSSI F. (1948): Festigkeit und Verformung von Nadelholz bei Druck quer zur Faser. Schweizer. Ztschr. f. Forstwesen 99 (106-114).
- FUKAZAWA K. (1984): Juvenile Wood of Hardwoods judged by Density Variation. IAWA Bull. 5, 1 (65-73).
- FUSSEDER H., WENNINGER H. und BECK H. (1958): Holz-Oberflächenbehandlung. Augsburg: Hans Rösler Verlag.
- GOTTWALD H. (1958): Handelshölzer. Hamburg: F. Holzmann Verlag.
- GOTTWALD H. und SCHWAB E. (1975): Kosipo. Holz Roh-Werkst. 33, 1 (37-44).

- GRODE H.-P. (1981): Form- und Lagetoleranzen - Stand der nationalen und internationalen Normungsarbeiten. DIN-Mitt. 60, 11 (678).
- GROSSER D. (1977): Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- GRUNVOGEL H. (1986): Intraannuelle Dichteschwankungen auf verschiedenen Radialen bei Fichten und anderen Nadelhölzern. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. d. L.-M.-Univ. München.
- HÖLLDORFER B. (1985): Grundlagenversuche zur Methodik der Rohdichtebestimmung durch Gewichtsverlust nach Sandstrahlen. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. d. L.-M.-Univ. München.
- HÖSTER H.-R. und LIESE W. (1966): Über das Vorkommen von Reaktionsgewebe in Wurzeln und Ästen der Dikotyledonen. Holzforschung 20, 3 (80-90).
- JAYME G. (1951): Über die Bedeutung des Zugholzanteils in Pappelhölzern. Holz Roh-Werkst. 9, 5 (173-175).
- KELLER R. und KEUXET D. (1973): Méthode de la Mesure des Données microdensitométriques et de leur Traitement à l'Ordinateur. I.U.F.R.O 5 - Meeting 22/9 - 12/10 Pretoria. Proceedings Vol. 2.
- KENNEDY R. W. (1968): Influence of Some Anatomical Variables and Density On Behavior. For. Prod. J. 18, 3 (36-40).
- KEYLWERTH R. (1951): Formänderungen in Holzquerschnitten. Holz Roh-Werkst. 9, 7 (254-260).
- KIRCHHOFF H. (1975): Strahlen 75. Fachbericht f. Oberflächen-technik 13 (16-18).
- KISSER J. und LEHNERT I. (1951): Ein neues Verfahren zur Bestimmung des Früh- und Spätholzanteiles bei Nadelhölzern. Mitt. d. Österr. Ges. f. Holzforschung.
- KLAUDITZ W. und STOLLEY I. (1955): Über die biologisch-mechanischen und technischen Eigenschaften des Zugholzes. Holzforschung 9, 1 (5-10).
- KNIGGE W. und SCHULZ H. (1961): Einfluß der Jahreswitterung 1959 auf Zellartverteilung, Faserlänge und Gefäßweite verschiedener Holzarten. Holz Roh-Werkst. 19, 8 (293-303).
- KNIGGE W. und SCHULZ H. (1966): Grundriß der Forstbenutzung. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey.
- KOLLMANN F. (1937): Eine neue Abnützungsprüfmaschine. Holz Roh-Werkst. 1 (87-89).

- KOLLMANN F. (1941): Die Esche und ihr Holz. Schriftenr. Eigenschaften und Verwertung der deutsch. Nutzhölzer. Berlin: Verlag von Julius Springer.
- KOLLMANN F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. I, 2. Aufl.. Berlin, Göttingen, Heidelberg, München: Springer-Verl. und Verlag J.F. Bergmann.
- KOLLMANN F. (1959): Zur Frage der Querdrukfestigkeit von Holz. Holzforsch. u. -verw. 11 (109-121).
- KOLLMANN F. (1960): Verformung und Fließen bei Querdrukbelastung von Holzwürfeln. Materialprüf. 2, 8 (289-294).
- KREMPL H. (1963): Das Holz der Linde. Cbl. ges. Forstwesen 80, 2 (123-125).
- LADELL J. L. (1959): A Method of Measuring the Amount and Distribution of Cell Wall Material in transverse Microscope Sections of Wood. J. of the Inst. of Wood Sci. 3 (43-46).
- LEHMANN E. und VOGEL W. (1928): Das Sandstrahlgebläse. Schriften aus dem Gesamtgebiet der Gewerbehygiene 21.
- LESNINO G. (1984): Mikroskopische Untersuchung am Schutzholz einheimischer Laubhölzer. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. d. L.-M.-Univ. München.
- McINTOSH D. C. (1955 a): Effect of Rays on Radial Shrinkage of Beech. For. Prod. 5, 1 (67-71).
- McINTOSH D. C. (1955 b): Shrinkage of Red Oak and Beech. For. Prod. J. 5, 5 (355-359).
- MAIER F. (1983): Untersuchung des Holzes gesunder und kranker Fichten mit Hilfe der Sandstrahltechnik. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. d. L.-M.-Univ. München.
- MARIAN J. E. und STUMBO D. A. (1960): Ein neues Verfahren der Jahrringanalyse und der Rohdichtebestimmung durch Messung des Oberflächengefüges. Holz Roh-Werkst. 18, 8 (287-296).
- MAYER-WEGELIN H. (1951): Das Holzgefüge im Jahrring und die Bestimmung des Früh- und Spätholzanteils. Holz-Zbl. 77, 7 (39-41).
- MAYER-WEGELIN H. (1957): Die Verwendbarkeit des Pappelholzes auf Grund seines Aufbaues und seiner kennzeichnenden Eigenschaften. Holzforschung 11, 5/6 (130-139).
- MEYER-UHLENRIED K.-H. (1957): Holzanatomische Untersuchungen an der Pappel. Holzforschung 11, 5/6 (150-157).
- MULLER-STOLL W. R. (1947): Photometrische Holzstruktur-Untersuchungen. I. Mitteilung. Planta 35 (397-426).

- MULLER-STOLL W. R. (1949): Photometrische Holzstrukturuntersuchungen. II. Mitteilung. Forstw. Cbl. 68 (21-63).
- NEČESANÝ V. und CETLOVÁ J. (1969): Über den Einfluß äußeren Wachstumsbedingungen auf die Struktur des Pappelholzes (*Populus monilifera*). Holzforschung 23, 3 (74-82).
- NOACK D., SCHWAB E. und BARTZ A. (1973): Characteristics for a Judgment of the Sorption and Swelling Behavior of Wood. Wood Sci. Technol. 7 (218-236).
- NORMAND D. (1955): Atlas des Bois de la Côte d'Ivoire. Bd. 2. Centre Technique Forestier Tropical Nr. 9.
- PARKER M. L., SMITH J. H. G. und JOHNSON S. (1978): Annual-Ring Width and Density Patterns in Red Alder. Wood and Fiber 10, 2 (120-130).
- PECHMANN H. von (1958): Die Auswirkung der Wuchsgeschwindigkeit auf die Holzstruktur und die Holzeigenschaften einiger Baumarten. Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen 109, 11 (615-647).
- POLGE H. (1978): Fifteen Years of Wood Radiation Densitometry. Wood Sci. Technol. 12 (187-196).
- RENDLE B. J. (1960): Juvenile and adulte Wood. J. of the Inst. of Wood Sci. 5 (58-61).
- SACHSSE H. (1960): Zur Methodik der Strukturprüfung von Hölzern mit dem Nadelstichverfahren. Holzforschung 14, 6 (168-178).
- SACHSSE H. (1965): Untersuchungen über Eigenschaften und Funktionsweise des Zugholzes der Laubbäume. Schriftenr. der Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen, Bd. 35. Frankfurt/M.: J. D. Sauerländer's Verlag.
- SACHSSE H. (1984): Zur Dichtebestimmung von Hölzern mittels mikroskopischer Linearanalyse. Holz Roh-Werkst. 42 (121-129).
- SCHEIBER Chr. (1965): Tropenhölzer. Leipzig: Fachbuchverlag.
- SCHMIDT E. (1940): In: Bongossi. Merkblatt Nr. 9, Merkblätter über koloniale Nutzhölzer für die Praxis.
- SCHMIDT E. (1941): Mikrophotographischer Atlas der mitteleuropäischen Hölzer. Neudamm: J. Neumann.
- SCHMIDT E. (1951): Überseehölzer. Berlin-Grunewald: Fritz Haller Verlag.
- SCHNIEWIND A. P. (1959): Transverse Anisotropy of Wood: a Function of Gross Anatomic Structure. For. Prod. J. 9, 10 (350-359).
- SCHÜTT P. und KOCH W. (1978): Allgemeine Botanik für Forstwirte. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey.

- SCHULZ H. (1957): Der Anteil der einzelnen Zellarten an dem Holz der Rotbuche. Holz Roh-Werkst. 15, 3 (113-118).
- SCHULZ H. (1982): Über die Nützlichkeit des Sandstrahlens für die Analyse von Holz und Holzprodukten. Holz Roh-Werkst. 40 (449-453).
- SCHULZ H. (1984): Stiffening Phenomena in Annual Rings of coniferous Wood. Wood Sci. Technol. 18 (19-32).
- SCHULZ H. (1985): Härteprofile als Hinweis auf verschiedene Festigkeitssysteme im Holz. Holz Roh-Werkst. 43 (215-222).
- SCHUMANN R. (1985): Zusammenhänge zwischen Pilzbefall und dem Abrieb von Fichtenholz beim Sandstrahlen. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. d. L.-M.-Univ. München.
- SCHWEINGRUBER F. H. (1980): Dichteschwankungen in Jahrringen von Nadelhölzern in Beziehung zu klimatisch-ökologischen Faktoren, oder das Problem der falschen Jahrringe. Ber. Nr. 213 der Eidg. Anst. f. d. forstl. Versuchsw. Birmensdorf.
- SCHWEINGRUBER F. H. (1983): Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern, Stuttgart: Paul Haupt Verlag.
- SUENSON E. (1938): Zulässiger Druck auf Querholz. Holz Roh-Werkst. 1 (213-216).
- SUSS H. (1982): Die Holzanatomie als Hilfswissenschaft der Entomologie. Gleditschia 9 (27-31).
- SUSS H. und MÜLLER-STOLL W. R. (1970): Änderungen der Zellgrößen und des Anteils der Holzelemente in zerstreutporigen Hölzern innerhalb einer Zuwachsperiode. Holz Roh-Werkst. 28, 8 (309-317).
- SUSS H. und MÜLLER-STOLL W. R. (1980): Änderungen einiger Holzmerkmale der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von der Stammhöhe. Holztechnologie 21, 2 (72-76).
- SUSS H., LENGERT W. und MÜLLER-STOLL W. R. (1978): Vegetationsperiodische Änderungen der Gefäß- und Holzfaserweite sowie der Länge der Markstrahlzellen bei verschiedenen Laub- und Nadelholzarten. Holztechnologie 19, 4 (235-242).
- TRENDELENBURG R. (1939): Über Fasersättigungsfeuchtigkeit, Schwindmaß und Raumdichtezahl wichtiger Holzarten. Holz Roh-Werkst. 2, 1 (12-17).
- VORREITER L. (1955): Die Holzquellung als Funktion mehrerer veränderlicher Faktoren, insbesondere der Temperatur und der Holzabmessung. Holz Roh-Werkst. 13, 8 (301-312).
- WAGENFUHR R. (1968 a): Holzeigenschaftstafel Sapelli - Nr.8/A. Holztechnologie 9, 2 (135-136).

- WAGENFUHR R. (1968 b): Holzeigenschaftstafel Sipo - Nr.9/A. Holz-technologie 9, 4 (273-274).
- WAGENFUHR R. und SCHEIBER Chr. (1985): Holzatlas. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- WEDEL K. von (1966): Bohrspanuntersuchungen über das Gewicht des Bergahorn- und des Spitzahornholzes. Holz Roh-Werkst. 24, 8 (329-338).
- WOLKINGER F. (1970): Morphologie und systematische Verbreitung der lebenden Holzfasern bei Sträuchern und Bäumen. II. Zur Histologie. Holzforschung 24, 5 (141-147).
- YLINEN A. (1943): Über den Einfluß der Rohwichte und des Spätholzanteils auf die Brinnelhärte des Holzes. Holz Roh-Werkst. 6, 4 (125-127).
- ZIMMERMANN M. H. (1978): Hydraulic Architecture of some diffuse-porous Trees. Can. Journ. of Bot. 56 (2286-2295).
- ZURCHER E. R. (1986): Sprossachsen - Ontogenie der Bergulme (*Ulmus glabra* Huds.), bei Normal- und Langtagbedingungen. Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Ges. Zürich 131/4 (235-294).

7 ABBILDUNGEN

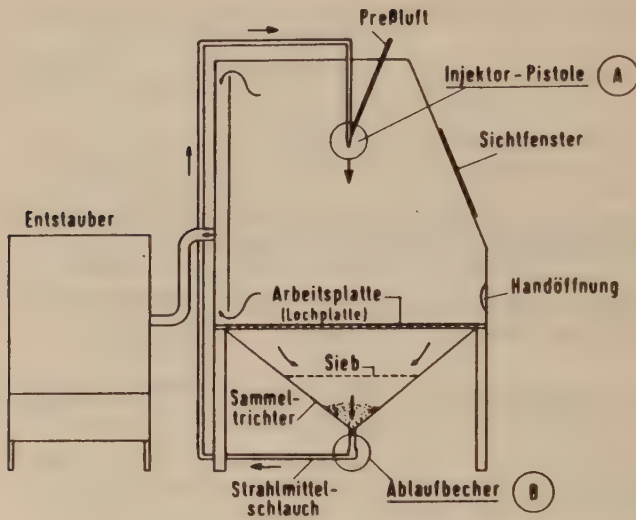
Hinweise:

Grundsätzlich liegt die Markröhre bei den Abbildungen von Querschnitten stets unterhalb bzw. links der Bildkante.

Phototechnisch bedingte Abweichungen von dieser Orientierung werden bei den Abbildungen vermerkt.

Bei irreführenden Strukturbildern wird die Orientierung besonders hervorgehoben.

Abb. 1: Injektor-Strahlanlage, schematische Darstellung



(A)

(B)

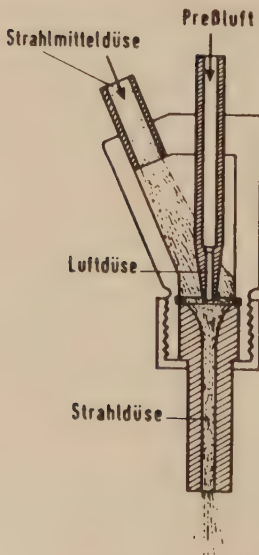
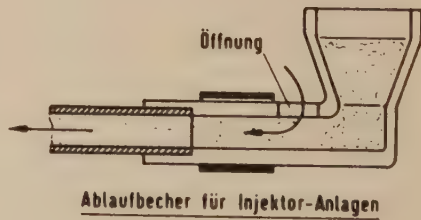
Injektor - PistoleAblaufbecher für Injektor-Anlagen

Abb. 2: Druck-Feinstrahlgerät "Sandmaster"



1. Strahlkabine
2. Zylinder
3. Prepluftleitung
4. Entstauber-Schlauch

Abb. 3: Korund 280: a. Querschnitt der Pappel zum Vergleich zwischen Gefäßdurchmesser und Korngröße (V: 14:1)
b. Querschnittprofil der Pappel nach Sandstrahlbehandlung (V: 7:1)

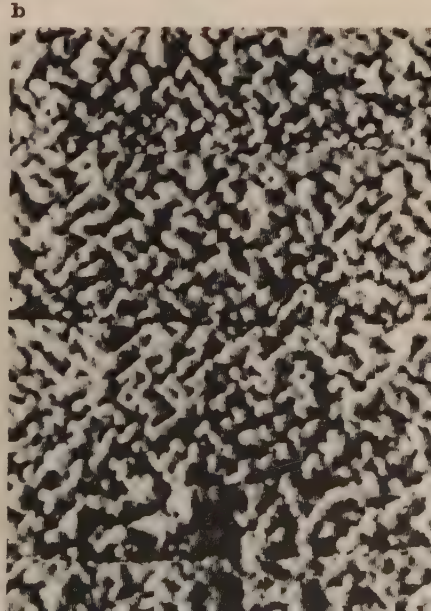
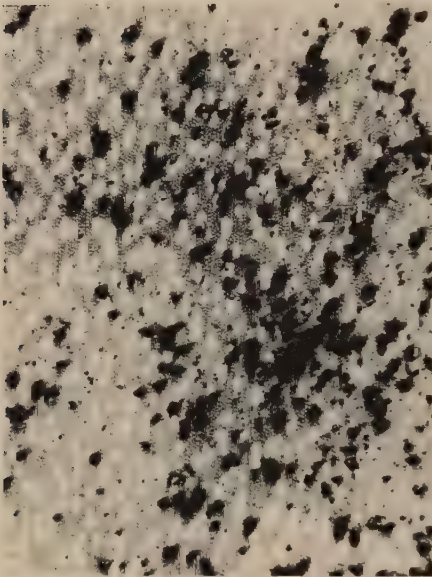


Abb. 4: Korund 220: a. Querschnitt der Pappel zum Vergleich zwischen Gefäßdurchmesser und Korngröße (V: 14:1)

b. Querschnittprofil der Pappel nach Sandstrahlbehandlung (V: 7:1)

a



b

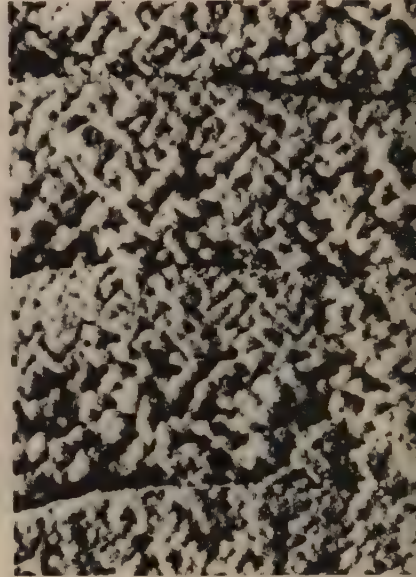


Abb. 5: Korund 100: a. Querschnitt der Pappel zum Vergleich zwischen Gefäßdurchmesser und Korngröße (V: 14:1)

b. Querschnittprofil der Pappel nach Sandstrahlbehandlung (V: 7:1)

a



b

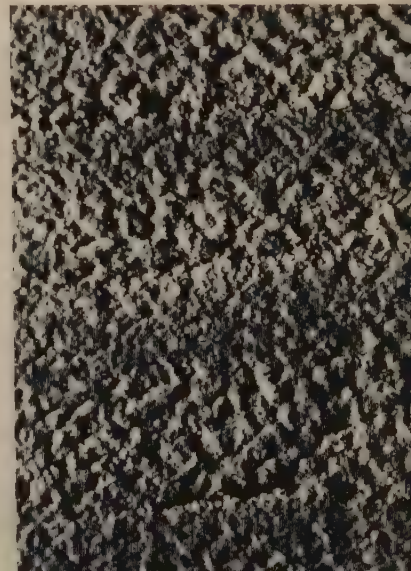


Abb.6: Korngrößenzusammensetzung von neuem und gebrauchtem Korund 280

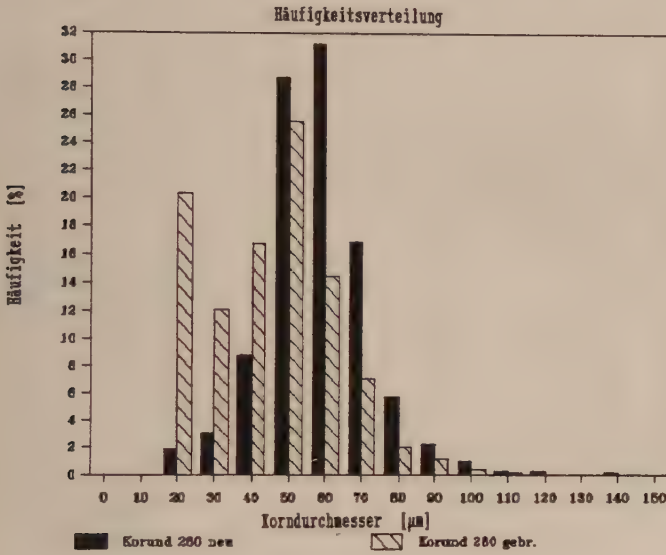
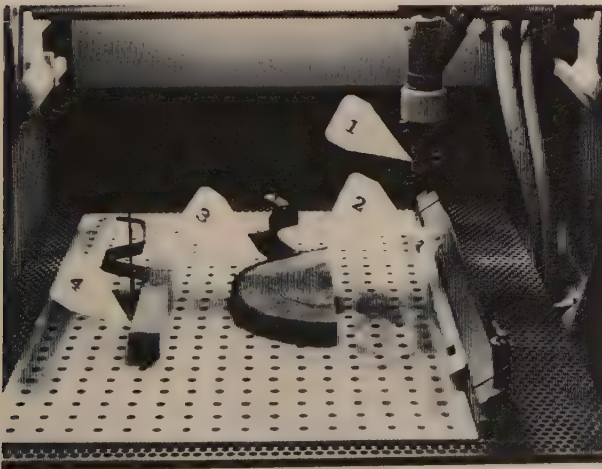


Abb. 7: Offene Injektor-Strahlkabine mit verschiedenen Proben und Probenhalterungen



1. Injektor-Pistole
2. Dreieckprobe
3. Scheibenhälfte
4. Radialstreifen

Abb. 8: Sandstrahlkegel über der Probenoberfläche: Gleichmäßige Abriebwirkung durch seitliches Verschieben der Strahldüse

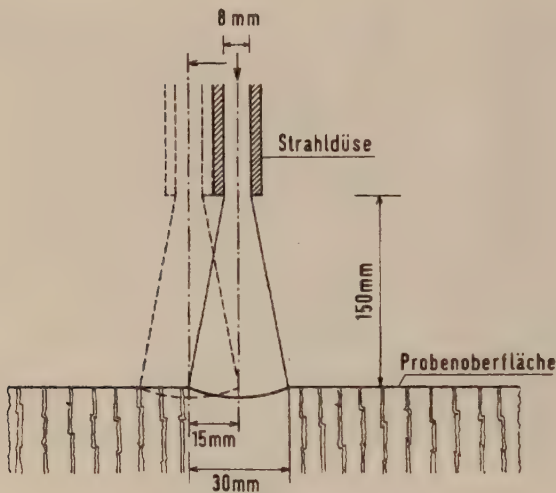


Abb. 9: Probenquerschnitt der Aspe (V: 7:1):

- a. Glatte, mit Kreide angeriebene Oberfläche
- b. Querschnittprofil nach kurzer Sandstrahlbehandlung mit Korund 280
- c. Querschnittprofil nach längerer Sandstrahlbehandlung mit Korund 280

a

b

c

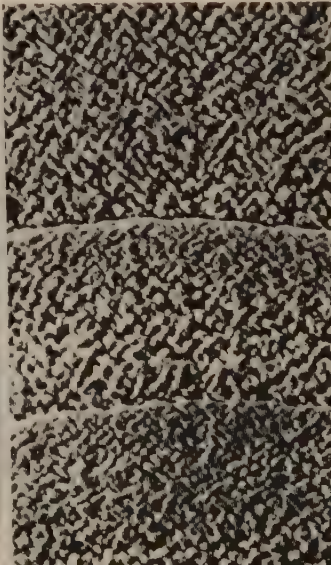
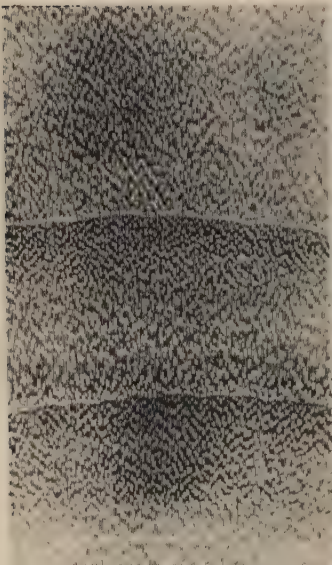
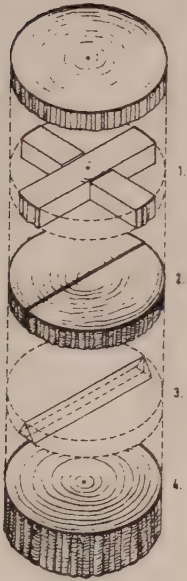


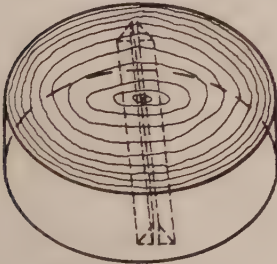
Abb. 10: Entnahme der verschiedenen Proben



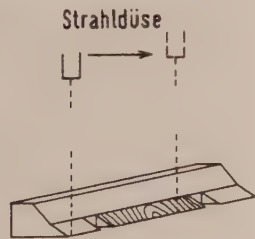
1. Radialstreifen
2. Scheibenhälfte
3. Dreieckprobe
4. Restscheiben für die Querproben
(Quellungs- und Festigkeitsprüfung)

Abb. 11: Dreieckprobe

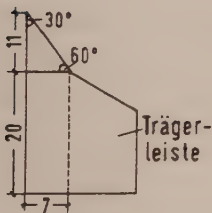
a. Entnahme



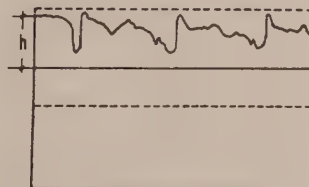
c. Lage in der Strahlkabine



b. Ausformung und Abmessung



Seitenansicht



Härteprofil
nach Sandstrahlbehandlung

Abb. 12: Welligkeit des Querschnittsprofils: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Begriffe

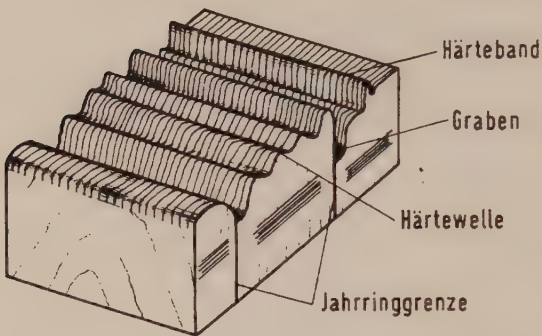


Abb. 13: Härteraster des Querschnittsprofils der Birke zur Erläuterung der Begriffe (Korund 280; V: 18:1; rasterelektronenmikroskopische Aufnahme)



1. Härteband
2. Härterippe
3. Rinne
4. Krater

Abb. 14: Entnahme der Querproben zur Quellungs- und Festigkeitsprüfung

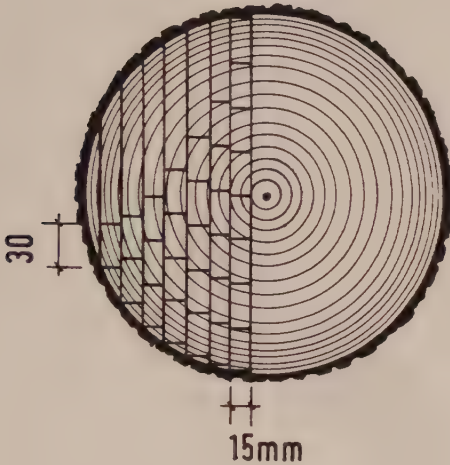


Abb. 15: Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung der Querdruckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls (F : Kraft; F_{pr} : Kraft an der Proportionalitätsgrenze; l : Längenänderung)

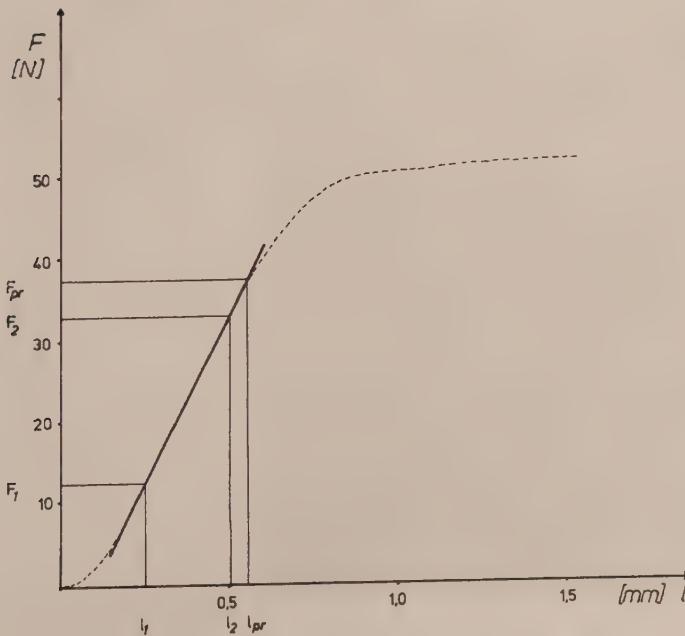


Abb. 16: Korrelation zwischen der Höhe (h) des Härtediagramms von Dreieckprobe und der Rohdichte (r) der zugehörigen Tangentialschnitte
(B: Bestimmtheitsmaß; ***: signifikant auf 0,1%-Niveau)

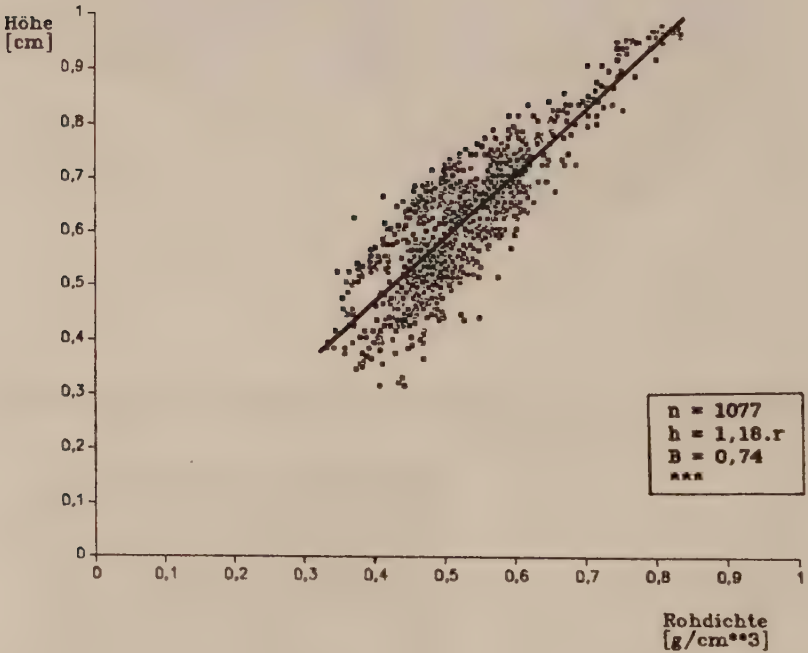
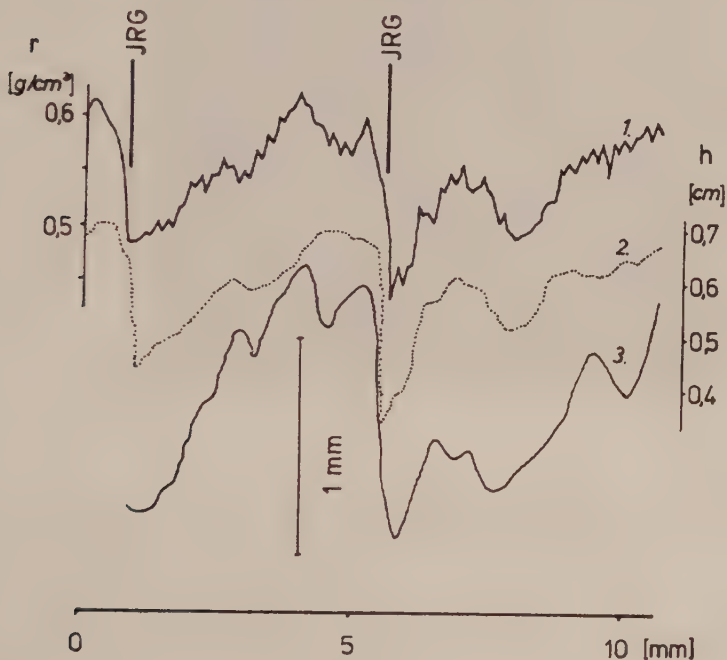


Abb. 17: Dichteverlauf und Härteprofile am Beispiel einer Lindenprobe:

- Vergleich zwischen dem Verlauf der Rohdichte (1.) und den Härteprofilen aus der zugehöriger Dreieckprobe (2.) und dem zugehörigem Querschnittprofil (3.; Laser-Abstandssensor-Kurve)
- Vergleich zwischen dem Härteprofil (Dreieckprobe: schwarz) und dem anatomischen Aufbau im zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1)

a



b

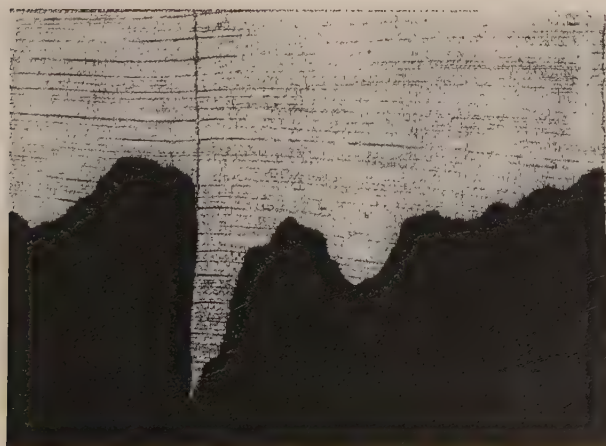


Abb. 18: Schwarzerle: Gegenüberstellung vom Härteprofil einer Dreieckprobe (schwarz) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; MR: Markröhre; JRG: Jahrringgrenze)

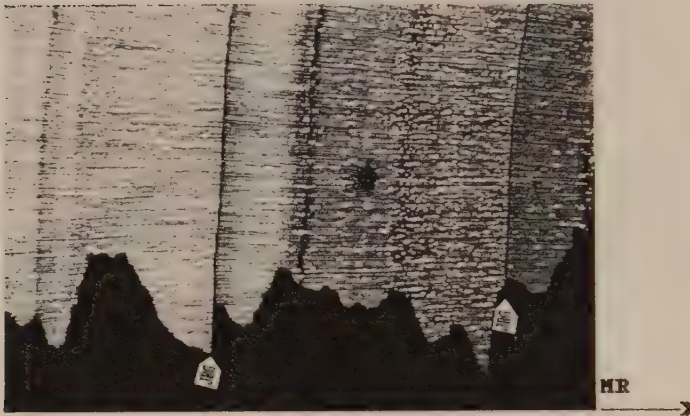


Abb. 19: Härteverlauf vom Typ Pappel: Mit dem Laser-Abstandssensor ermitteltes Härteprofil des Querschnitts über dem Stammdurchmesser einer Pappel

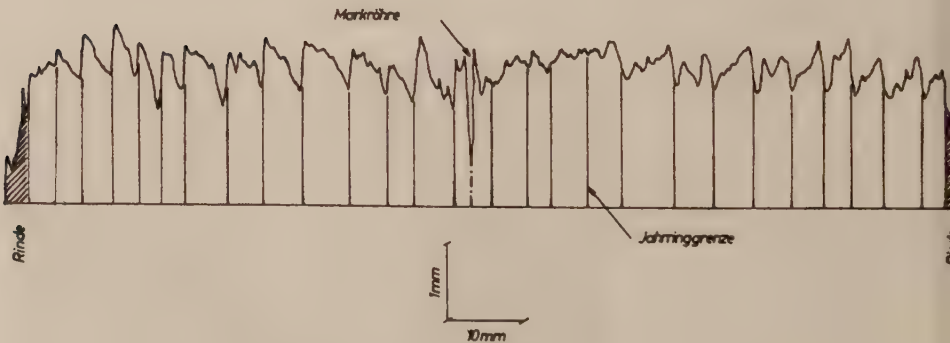


Abb. 20: Härteverlauf vom Typ Birke: Mit Hilfe des Laser-Abstandssensors
ermitteltes Härtediagramm eines Abschnittes des Querschnittsprofils
einer Birke

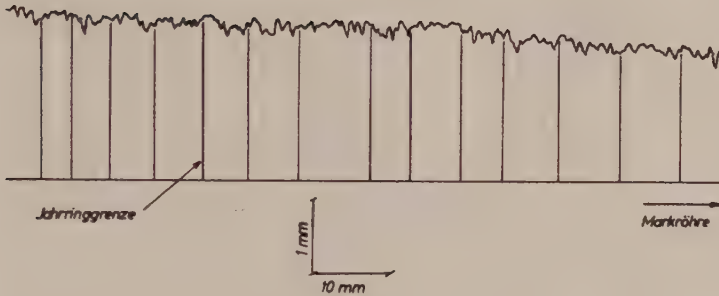
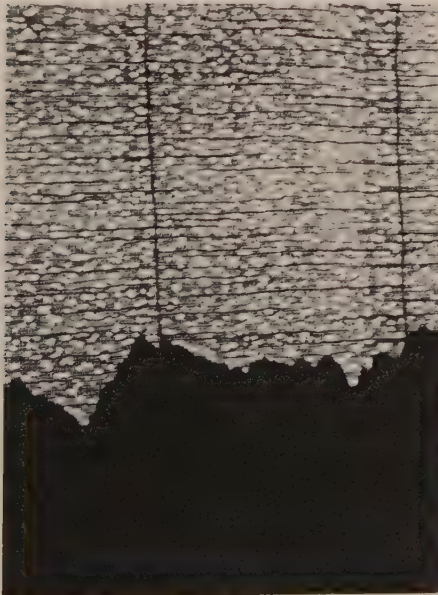


Abb. 21: Birke: Gegenüberstellung vom Härtediagramm (Dreieckprobe: schwarz) und
zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; MR: Markröhre)



MR

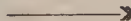


Abb. 22: Hainbuche: Härteverlauf im Jahrring mit intensiver Zugholzbildung. Gegenüberstellung vom Härtediagramm (Dreieckprobe: schwarz) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; SH: Spätholz; ZH: Zugholz; MR: Markröhre)

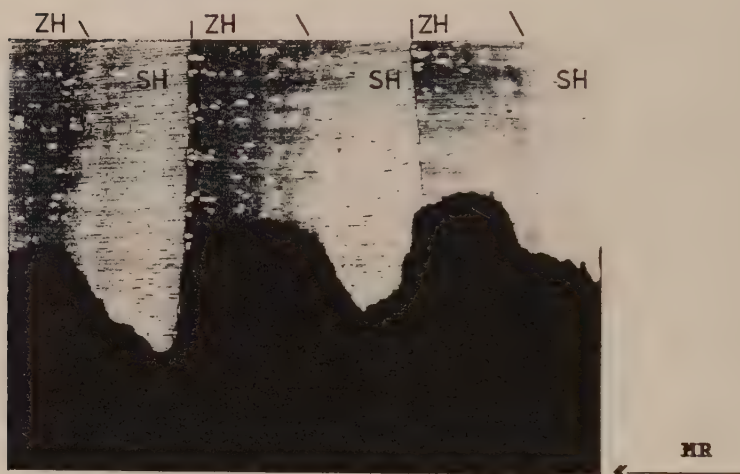


Abb. 23: Querschnittprofil eines zugholzhaltigen Jahrringes der Pappel (V: 7:1 JRG: Jahrringgrenze; ZH: Zugholz)

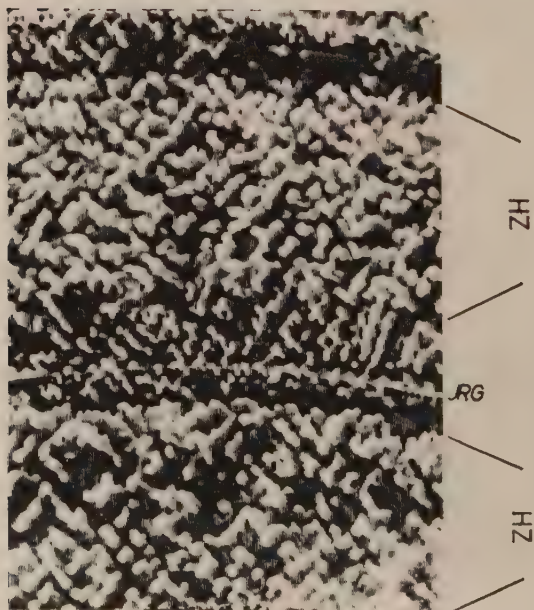


Abb. 24: Querschnittprofil zugholzhaltiger Jahrringe des Ahorns (V: 4:1;
JRG: Jahrringgrenze; ZH: Zugholz)

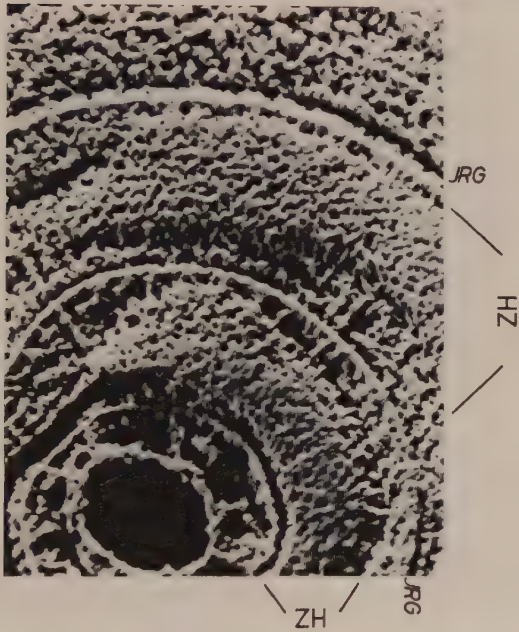


Abb. 25: Querschnittprofil (Korund 280) von einem Lindenast (V: 0,7:1)

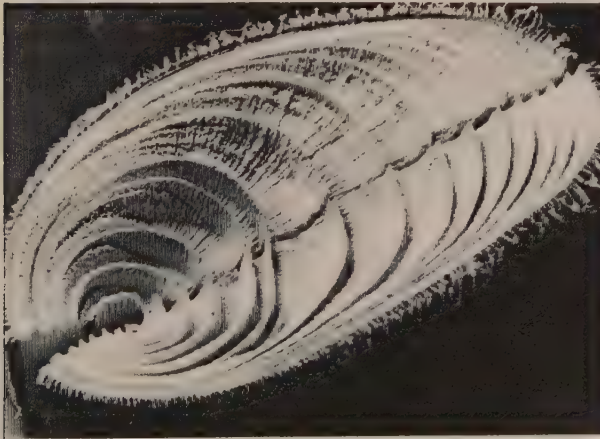


Abb. 26: Linde: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigem Mikroquerschnitt mit weichen Jahrringen (V: 7:1; JRG: Jahrringgrenze)

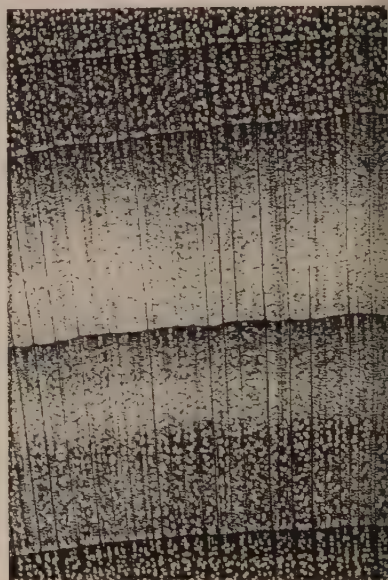
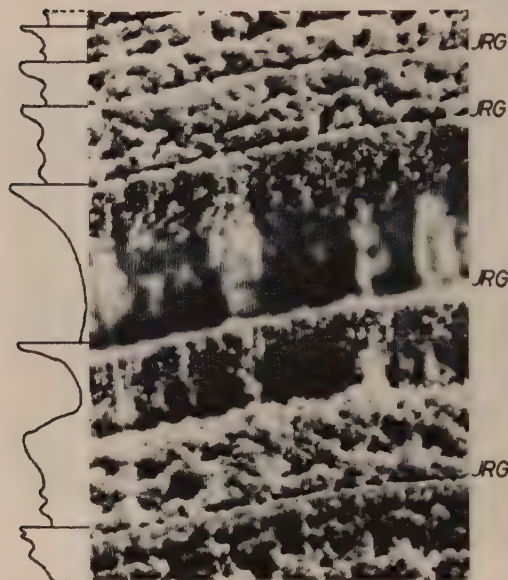


Abb. 27: Aspe: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; W: Härte-
welle; B: Härteband)

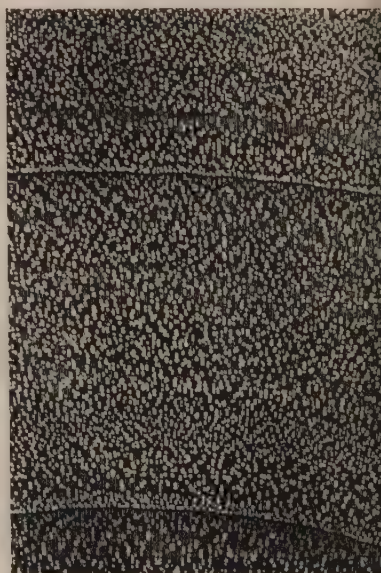
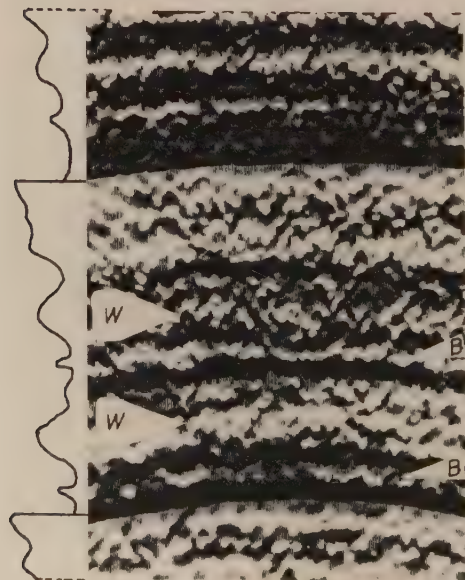


Abb. 28: Pappel: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und mit Kreide angeriebenen zugehörigen Querschnitt (V: 20:1; JRG: Jahringgrenze; W: Härtequelle)

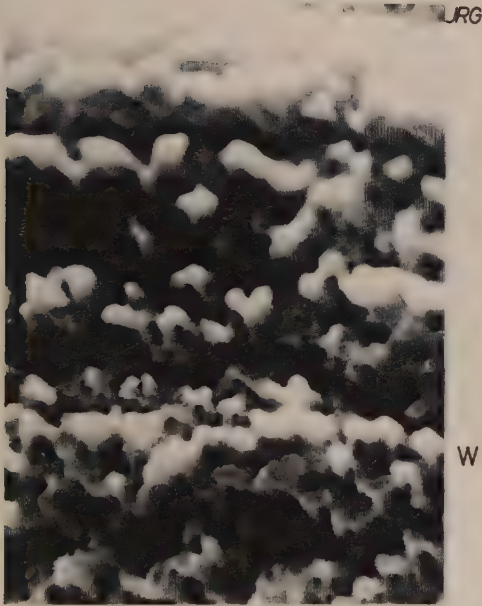
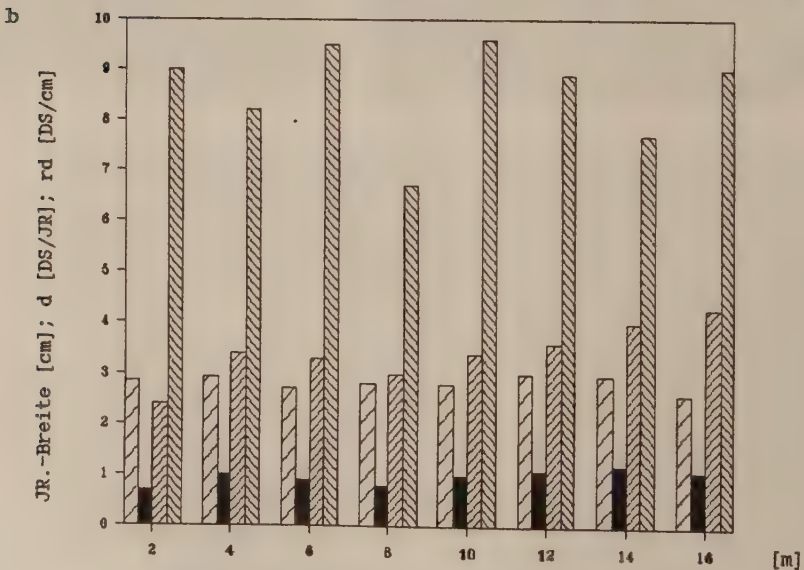
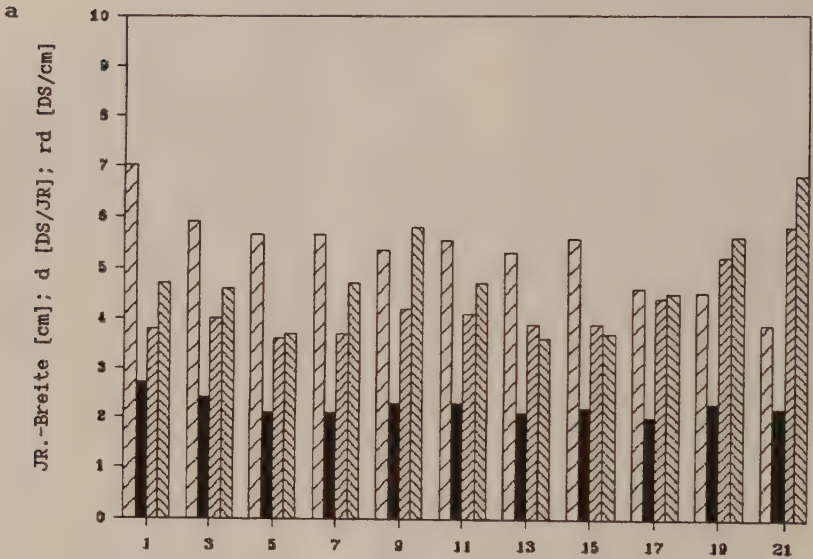


Abb. 29: Häufigkeit von intraannuellen Dichteschwankungen in Abhängigkeit der Höhe im Stamm 2er Pappeln: Schwarzpappel-Hybrid (a) und Aspe (b) (DS: Anzahl, d: absolute Häufigkeit, rd: relative Häufigkeit der Dichteschwankungen; JR: Jahrring; jug.: 5 marknächste Jahrringe)



▨ JR.-Breite ■ d gesamt

▨ rd gesamt ▨ rd jug.

Höhe im Stamm

Abb. 30: Schematische Darstellung der Lage der Jahrringgrenze im Härtediagramm (JRG: Jahrringgrenze)

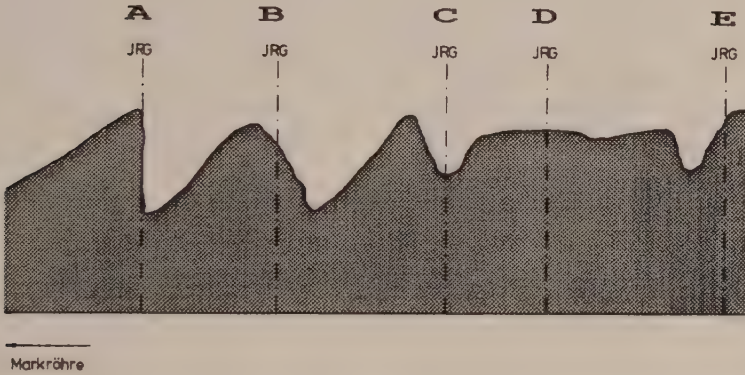


Abb. 31: Pappel: Übersicht des Querschnittsprofils (Korund 280; V: 6:1; ▷ : Jahrringgrenze)

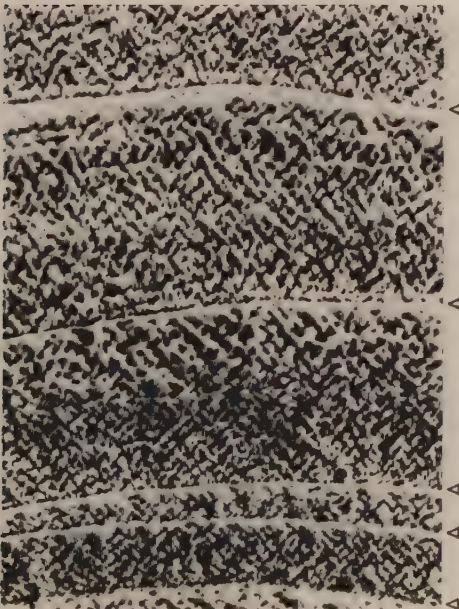


Abb. 32: Pappel: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt: Jahrringgrenze undeutlich (V: 10:1)

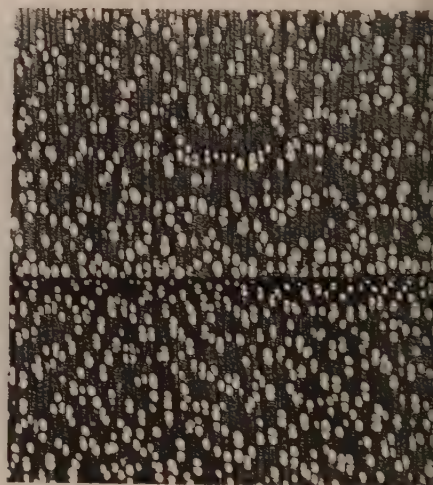


Abb. 33: Querschnittprofile einer Pappel (Korund 280; V: 7:1; ▽: Jahrringgrenze) im Stammfußbereich (a) und in 2 m Höhe (b)

a

b

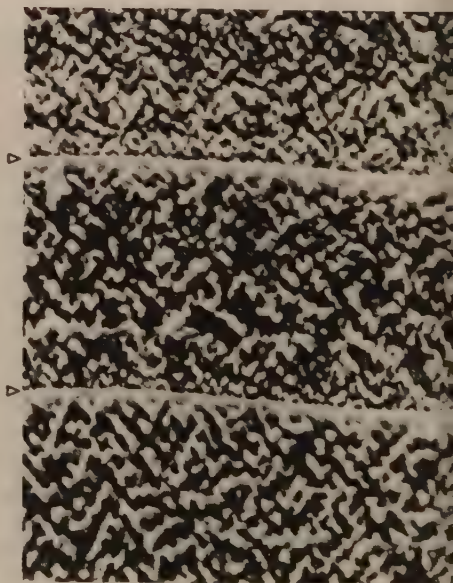
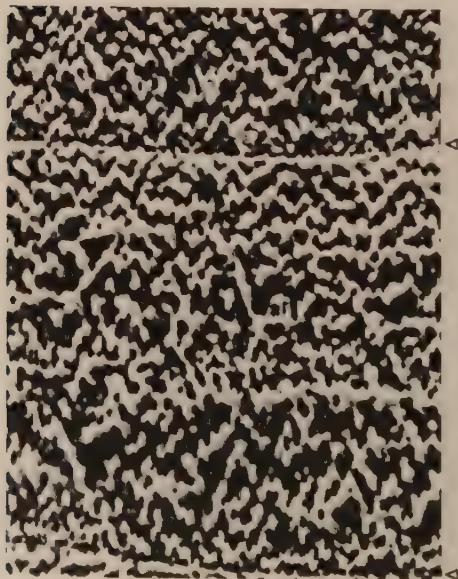


Abb. 34: Querschnittprofil einer Pappel (Korund 100; V: 0,3:1) mit intensiver Zugholzbildung (ZH). Radiale, zugholzfreie Streifen (R)

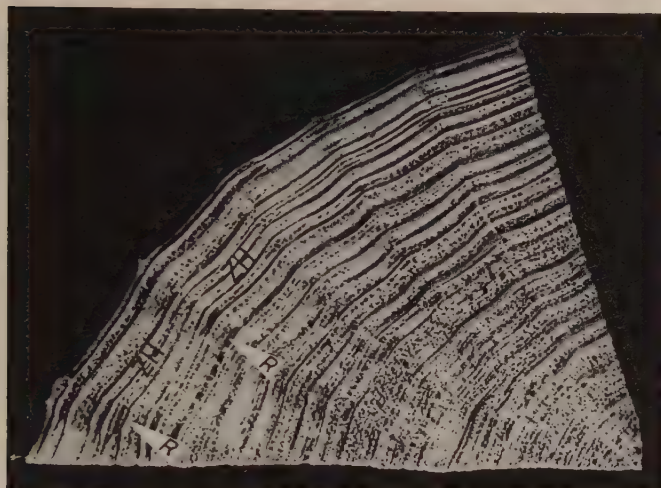


Abb. 35: Gegenüberstellung der Querschnittprofile (Korund 280; V: 7:1) der Pappel (a), Aspe (b) und Weide (c)

a

b

c

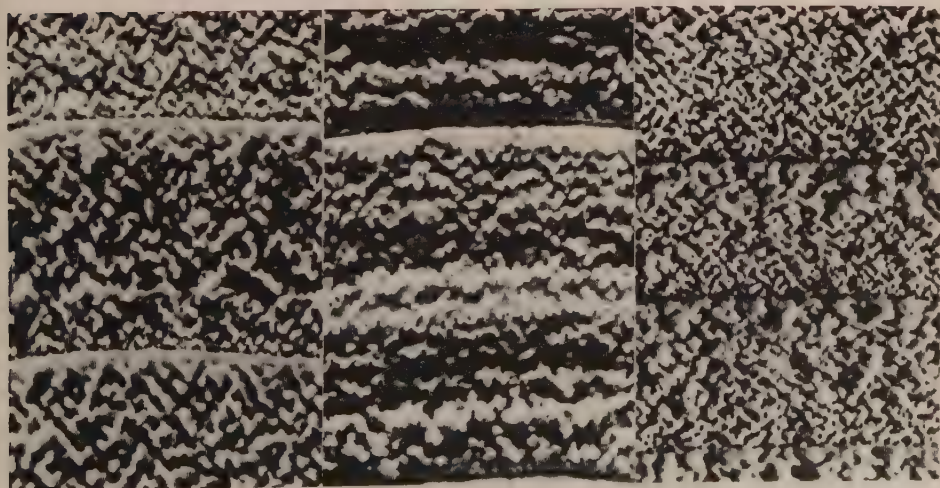


Abb. 36: Härtediagramm und Querschnittprofil der Roßkastanie (Korund 280; V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze; FW: Frühholz-Härtewelle)

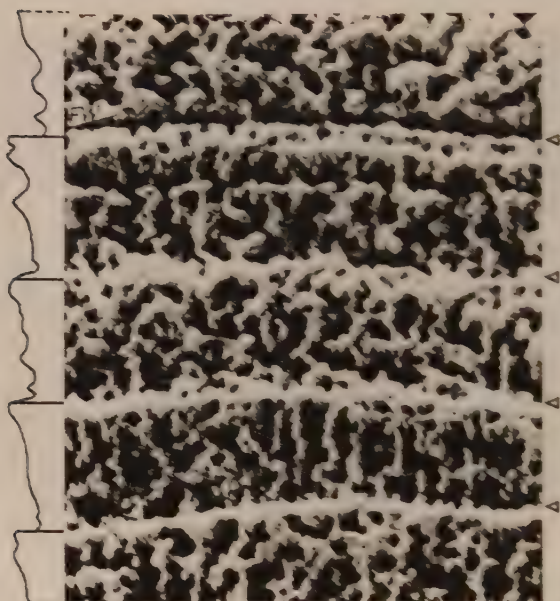


Abb. 37: Querschnittprofil der Roßkastanie (Korund 280; V: 4:1; ▷: Jahrringgrenze; FW: Frühholz-Härtewelle)



Abb. 38: Mikroquerschnitt der Roßkastanie (V: 10:1; R: Radiale Streifen)



Abb. 39: Linde: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1)

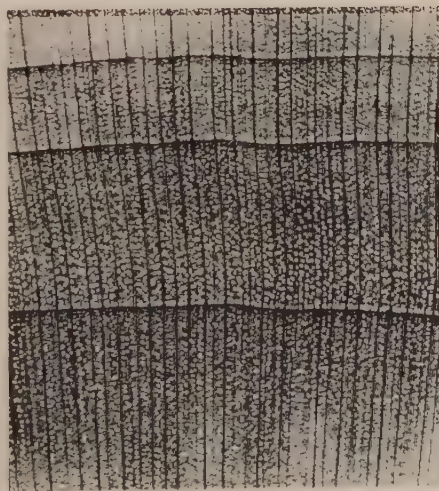
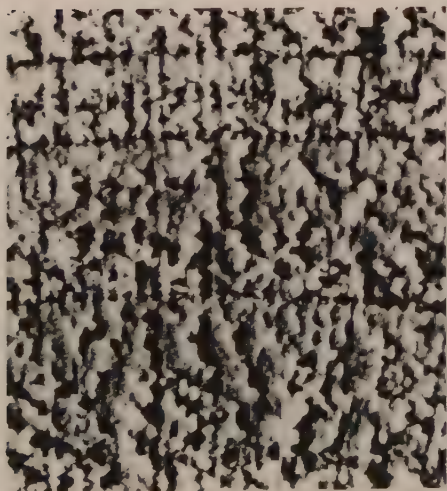


Abb. 40: Linde: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; FB: Frühholz-Härteband; W: Härtewelle)

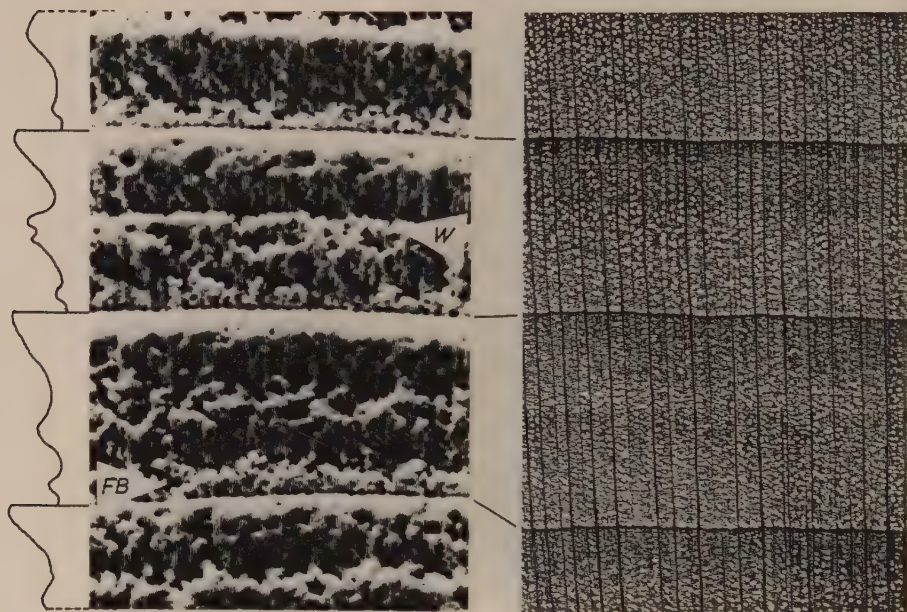


Abb. 41: Linde: Querschnittprofil des marknahen Bereiches (Korund 280; V:7:1; ▷: Jahrringgrenze)



Abb. 42: Grauerle: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und mit Kreide angeriebenen zugehörigen Querschnitt (V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze; W: Härtevolle)

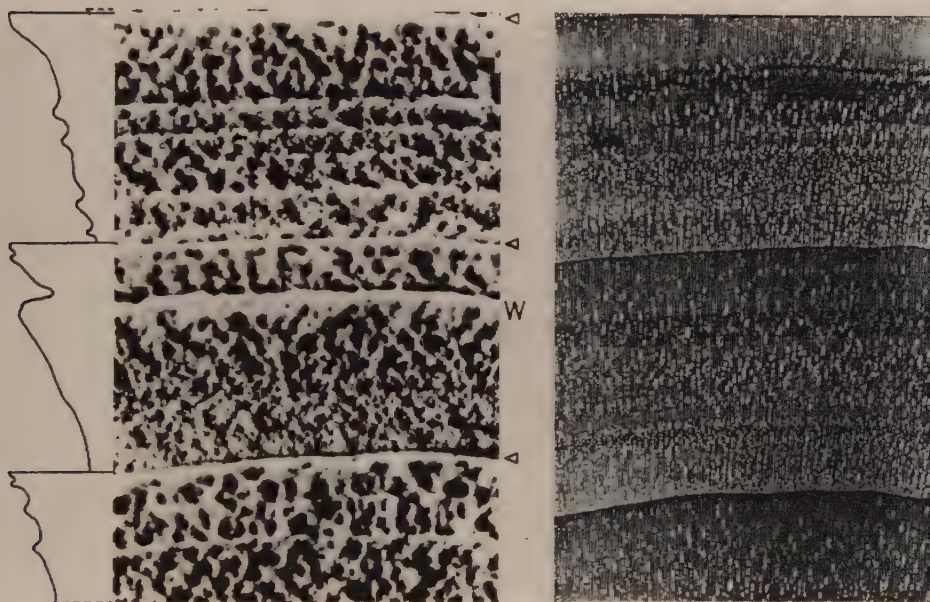


Abb. 43: Grauerle: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) des marknahen Bereiches und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze; W: Härtevolle)

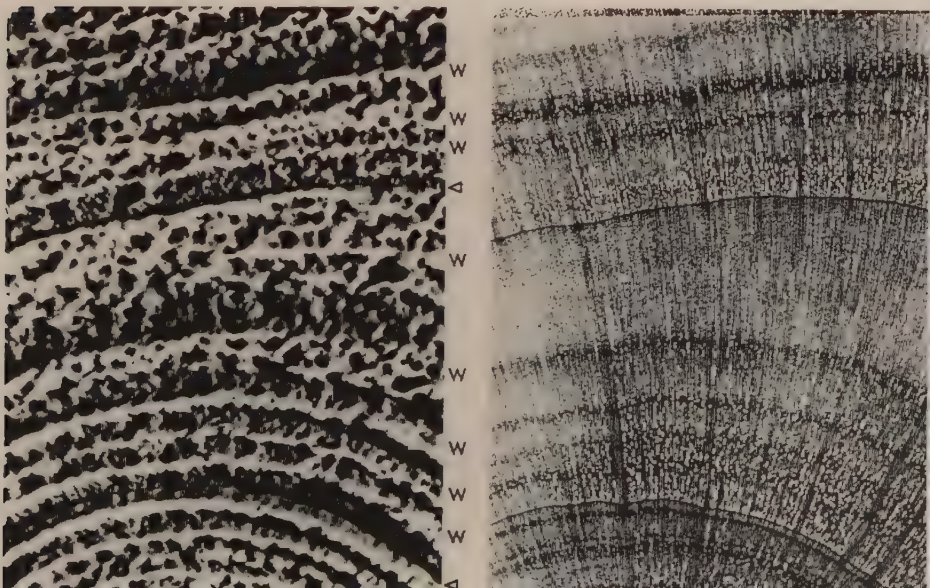
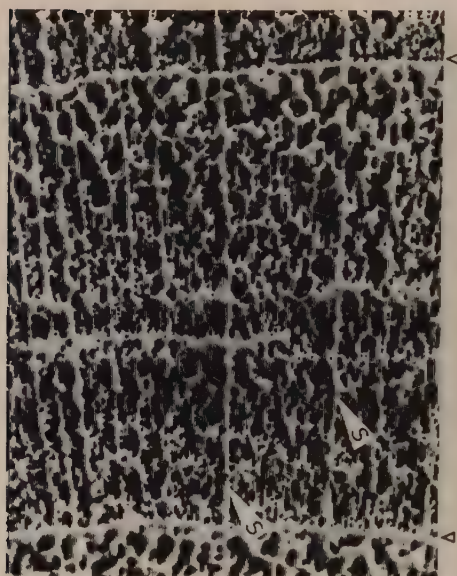


Abb. 44: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil der (a) Schwarzerle und der (b) Grauerle (Korund 280; V: 6:1; ▷: Jahrringgrenze; S: Scheinstrahl)

a



b

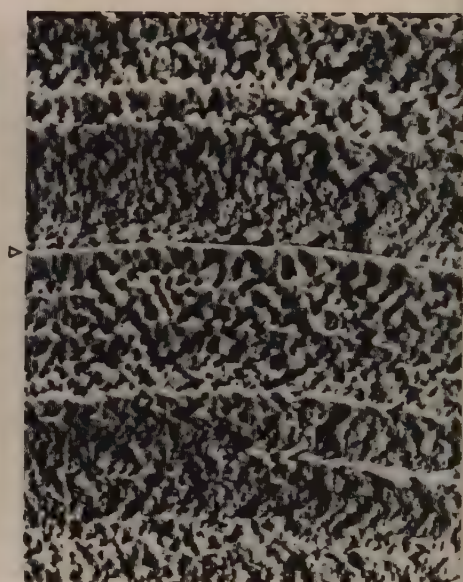


Abb. 45: Birke: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze)

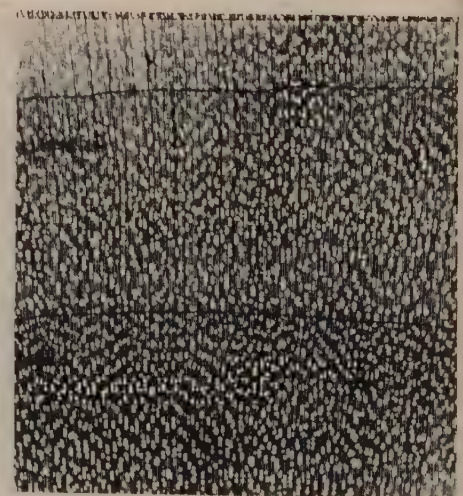
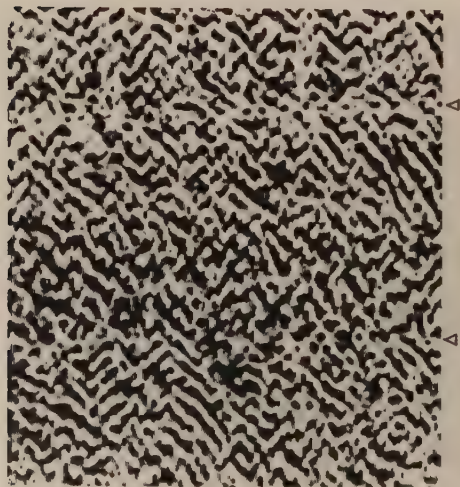


Abb. 46: Birke: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze; B: Härteband)

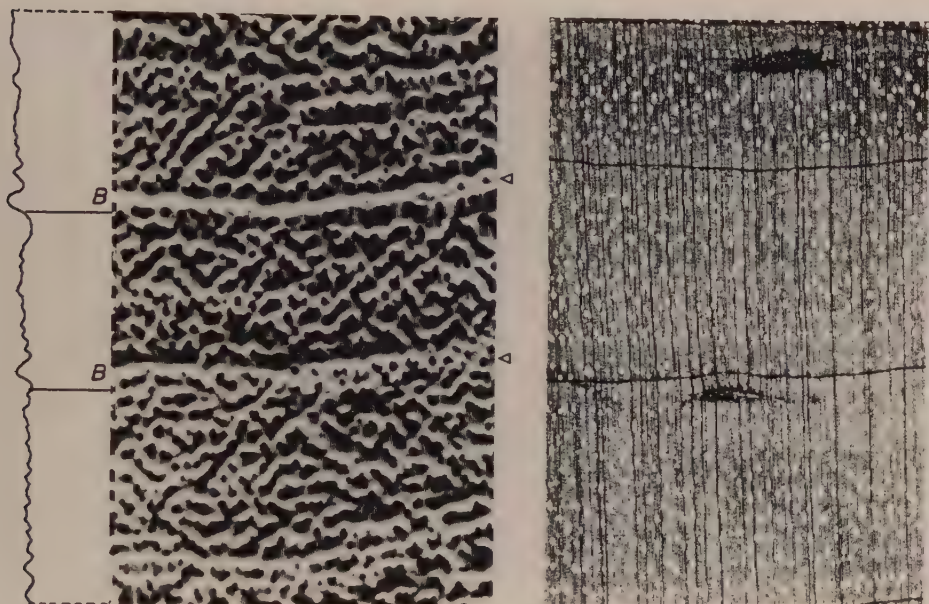


Abb. 47: Birke: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und mit Kreide angeriebenen zugehörigen Querschnitt (V: 18:1; ▷: Jahrringgrenze)

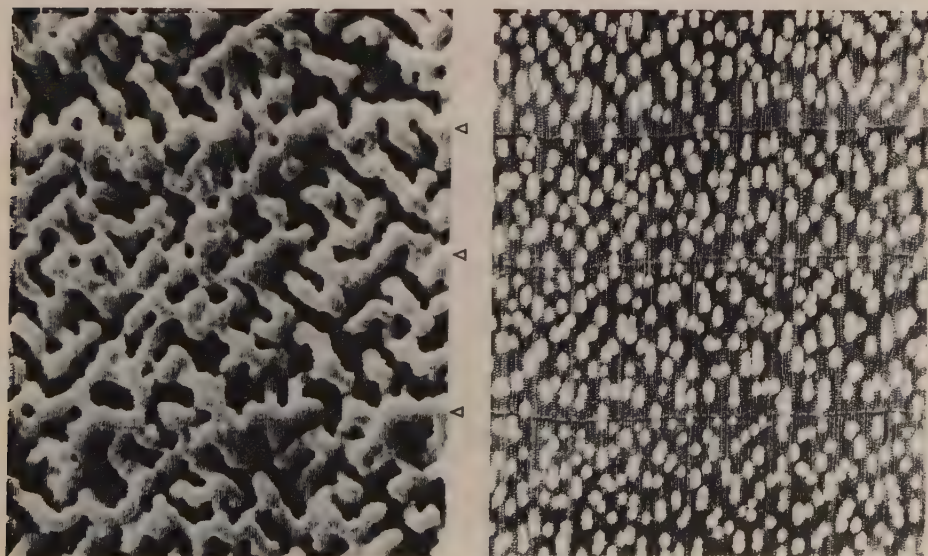


Abb. 48: Querschnittprofile der Birke (Korund 280; V: 4:1): a. am Stammfuß
b. in 2 m Höhe

a



b



Abb. 49: Birke: Mikroquerschnitt eines marknahen Jahrringes (V: 10:1)

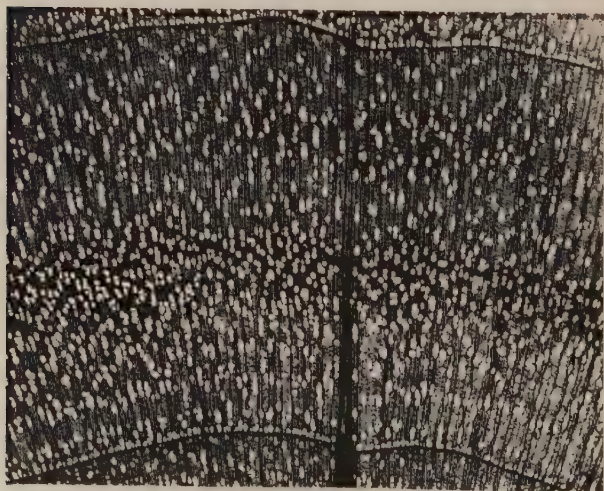


Abb. 50: Spitzahorn: Härte­diagramm und Querschnittprofil (Korund 280; V: 6:1;
▷: Jahrringgrenze)

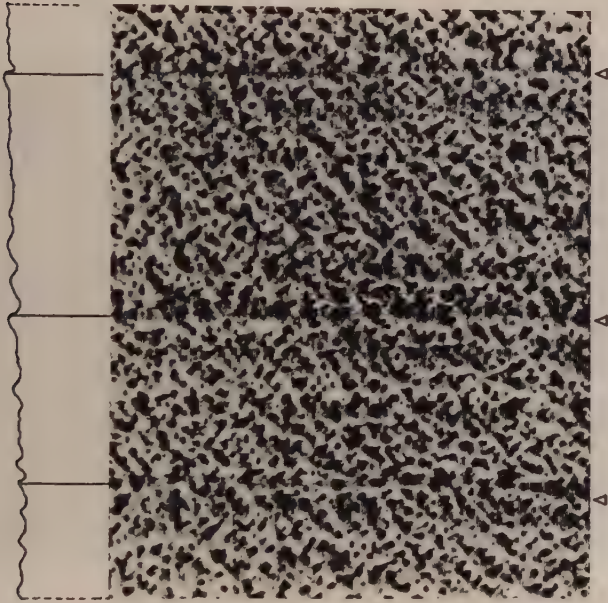


Abb. 51: Gegenüberstellung des Querschnitt­profils des (a) Bergahorns und
(b) Spitzahorns (Korund 280; V: 14:1; ▷: Jahrringgrenze)

a

b



Abb. 52: Bergahorn: Anatomischer Aufbau und Härteraster (V: 7:1):

a. Mit Kreide angeriebener, glatter Querschnitt

b. Querschnittprofil nach kurzer Strahldauer (Korund 280)

c. Querschnittprofil nach längerer Strahldauer (Korund 280)

a

b

c



Abb. 53: Mikroquerschnitt des Spitzahorns: Zonierung des Jahrringes
(V: 7:1; -->: tangentialer Band)

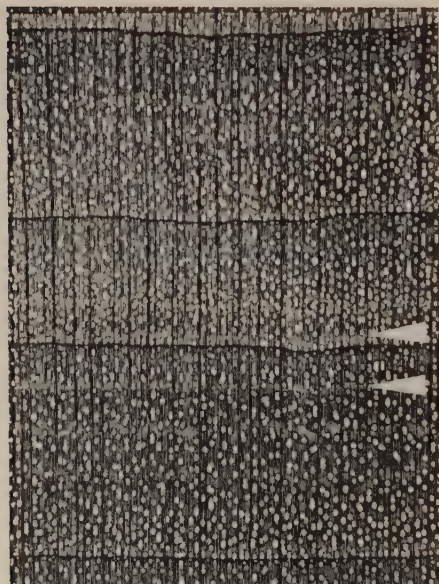


Abb. 54: Radialprofil des Bergahorns (Korund 280; V: 7:1; -->: Jahrringgrenze; MR: Markröhre)

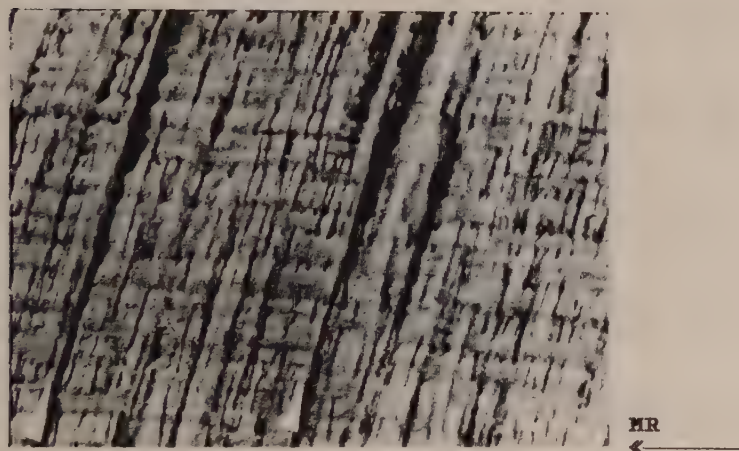


Abb. 55: Anatomischer Aufbau und Härteraster der Buche (V: 7:1):

- a. Mit Kreide angeriebener, glatter Querschnitt
- b. Querschnittprofil nach kurzer Strahldauer (Korund 280)
- c. Querschnittprofil nach längerer Strahldauer (Korund 280)

a

b

c

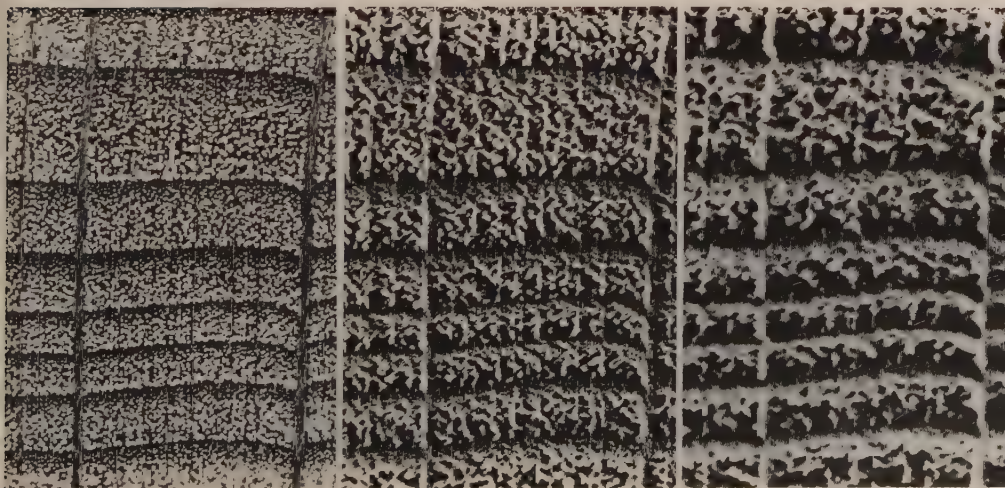


Abb. 56: Buche: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; W: Härtewelle)

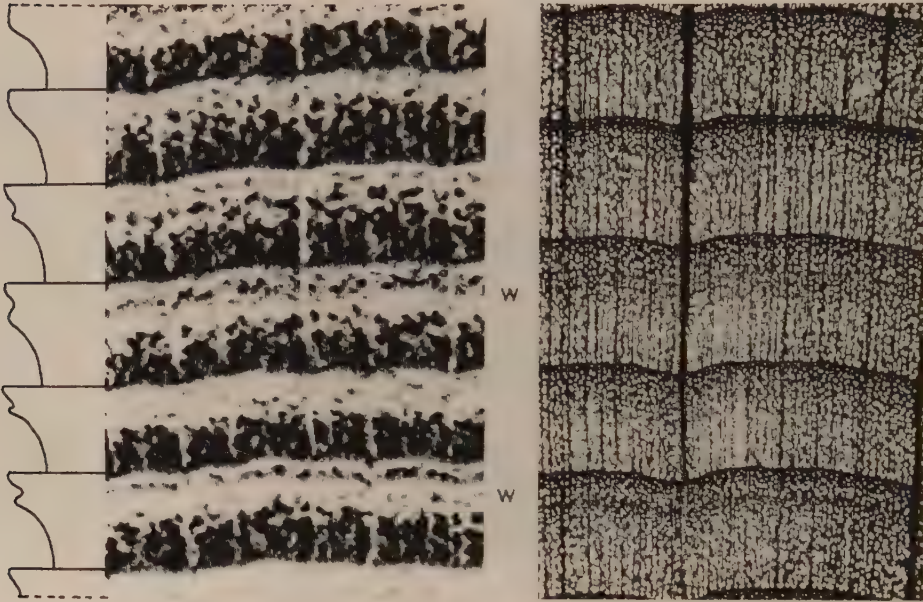


Abb. 57: Buche: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und mit Kreide angeriebenen zugehörigen Querschnitt (V: 18:1)

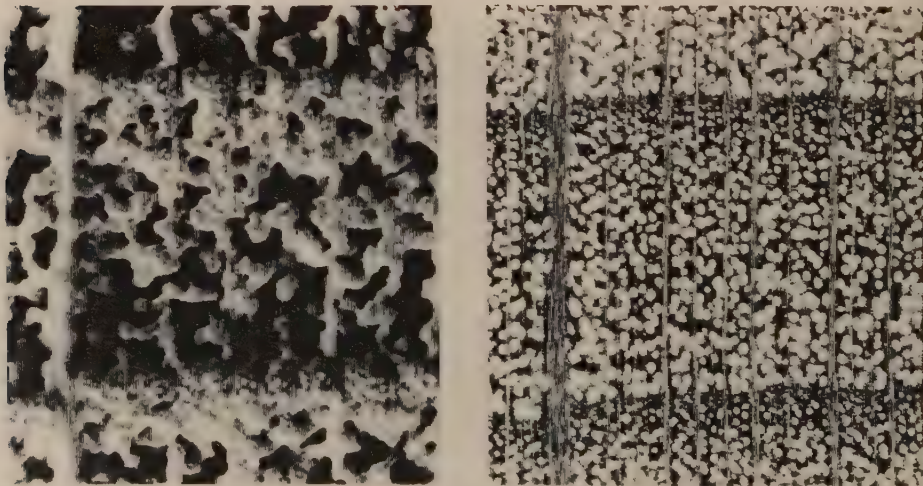


Abb. 58: Platane: Übersicht des Querschnittprofils (Korund 280; V: 3:1;
▷: Jahrringgrenze)



Abb. 59: Platane: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und
zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 8:1)



Abb. 60: Hainbuche: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 8:1; ▷: Jahrringgrenze; S: Scheinstrahl)

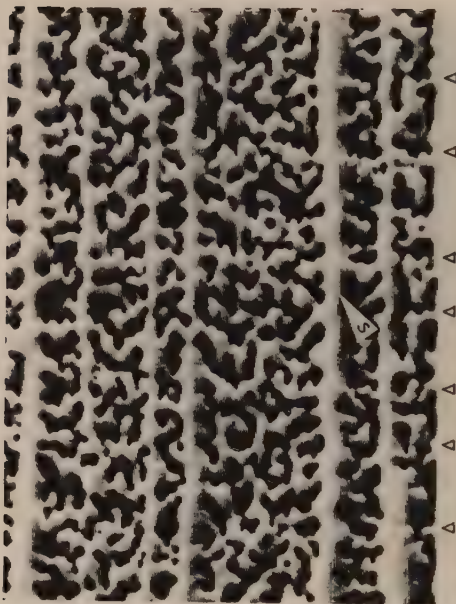


Abb. 61: Hainbuche: Querschnittprofil des marknahen Bereiches (Korund 280; V: 7:1; ▷: Jahrringgrenze)



Abb. 62: Gemeine Hasel: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 8:1; S: Scheinstrahl)



Abb. 63: Gemeine Hasel: Querschnittprofil des marknahen Bereiches (Korund 280; V: 7:1)



Abb. 64: Vogelkirsche: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; W:Härtewelle; FJ: Falscher Jahrring)

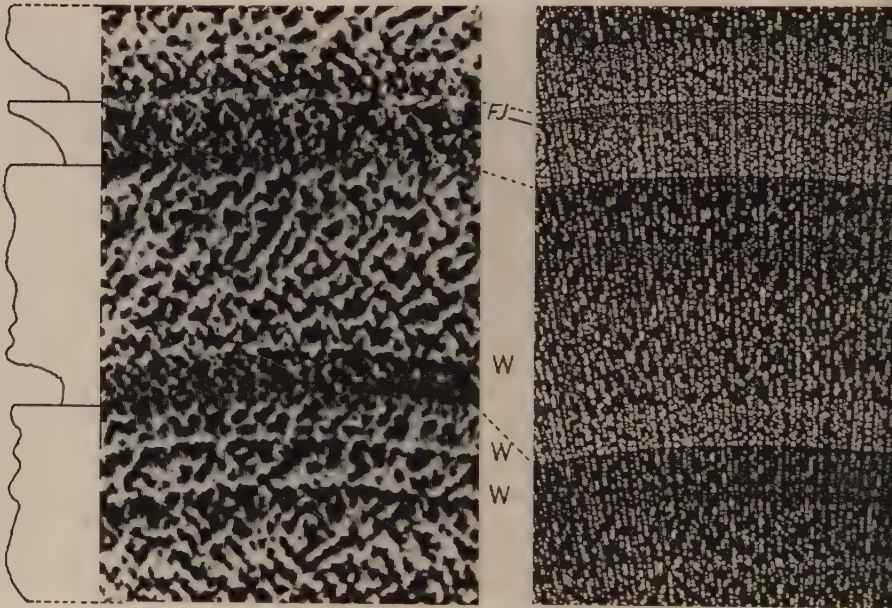


Abb. 65: Walnuß: Gegenüberstellung vom Härtediagramm, Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1)

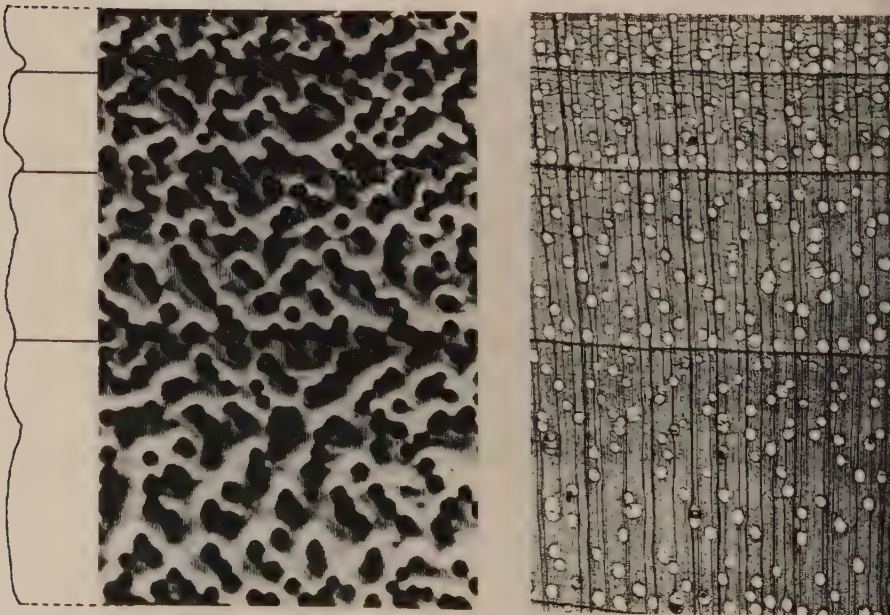
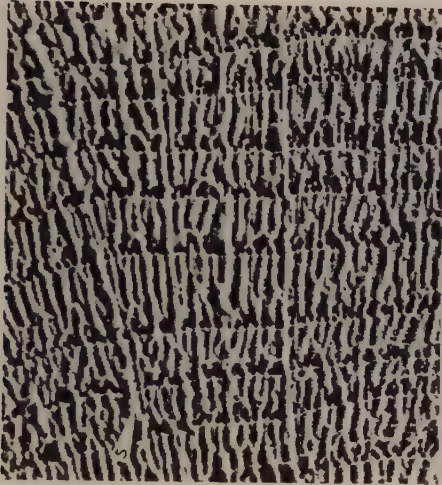


Abb. 66: Gegenüberstellung der Querschnittprofile der (a) Weißeiche und (b) Roteiche (Korund 280; V: 3:1; S: Holzstrahlen)

a



b

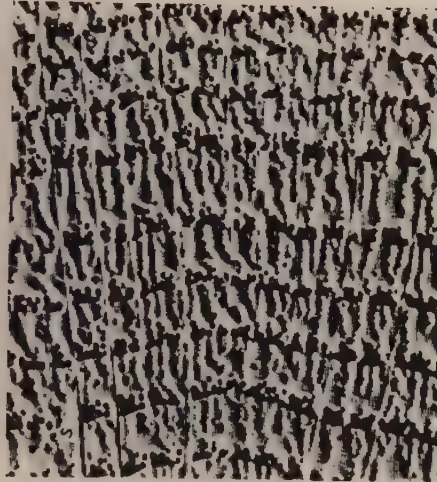


Abb. 67: Querschnittprofil der Esche (Korund 280; V: 3:1)



Abb. 68: Edelkastanie: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen geschliffenen Querschnitt (V: 7:1)



Abb. 69: Querschnittprofil der Robinie (Korund 280; V: 3:1)



Abb. 70: Querschnittprofil der Ulme (Korund 280; V: 3:1)



Abb. 71: Abachi: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1; Z: Grenze der Zuwachszone)



Z

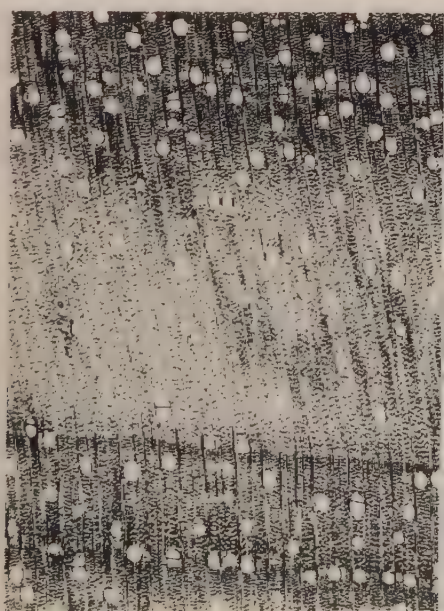


Abb. 72: Afzelia: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen Mikroquerschnitt (V: 7:1)



Abb. 73: Querschnittprofil von Balsa (Korund 280; V: 7:1)



Abb. 74: Querschnittprofil von Bongossi (Korund 280; V: 7:1)



Abb. 75: Khaya: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen geschliffenen Querschnitt (V: 7:1; Z: Grenze der Zuwachszone)

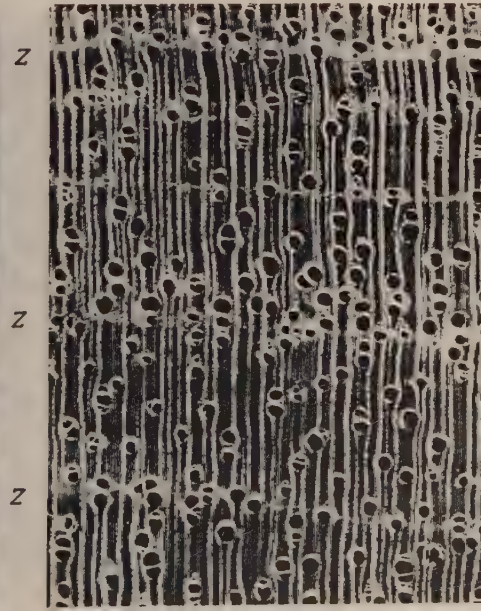
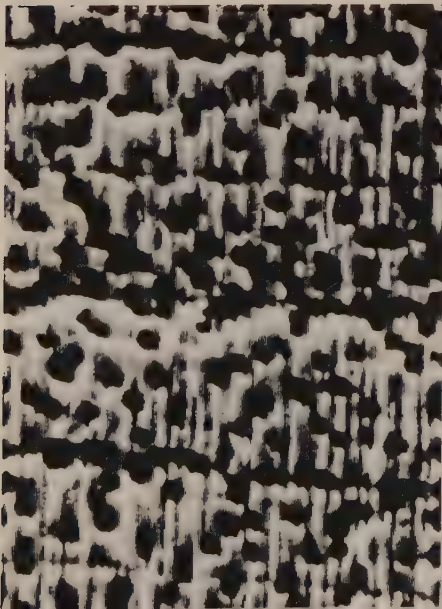


Abb. 76: Sipo: Gegenüberstellung vom Querschnittprofil (Korund 280) und zugehörigen, mit Kreide angeriebenen Querschnitt (V: 7:1; Z: Grenze der Zuwachszone)



Z



Z

Abb. 77: Tiama: Querschnittprofil (Korund 280; V: 7:1; Z: Grenze der Zuwachszone)



Z

Abb. 78: Sapelli: Querschnittprofil (Korund 280; V: 7:1; Z: Grenze der Zuwachszone)



Abb. 79: Kosipo: Querschnittprofil (Korund 280; V: 7:1)



Abb. 80: Kraft-Weg-Diagramme von radialen Querproben: 1. Pappel
2. Robinie
3. Ahorn

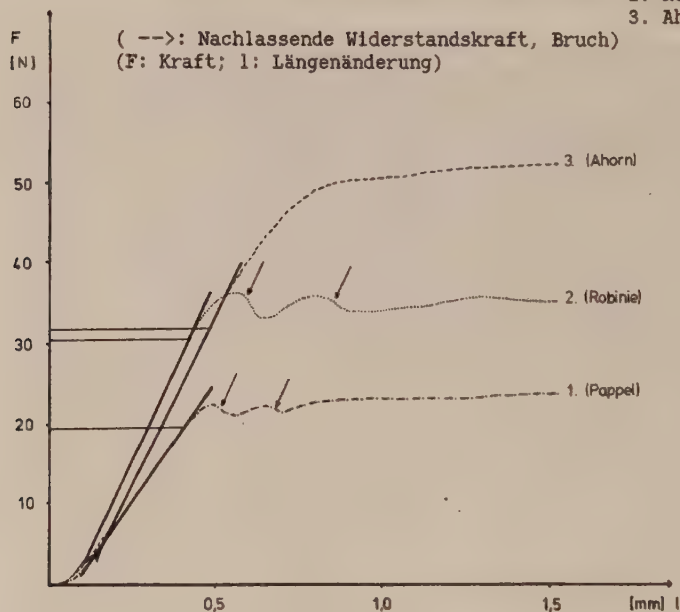


Abb. 81: Bruchstellen (Δ) im Querschnittprofil (Korund 280; V: 7:1) einer zusammengedrückten radialen Querprobe der Ulme



Abb. 82: Abhängigkeit der spezifischen Steifigkeit (E-Modul/Dichte) von der Richtung der Belastung in Querproben mit verschiedenen Winkeln zum Jahrringverlauf bei Birke, Pappel, Ahorn, Buche, Linde, Robinie und Ulme

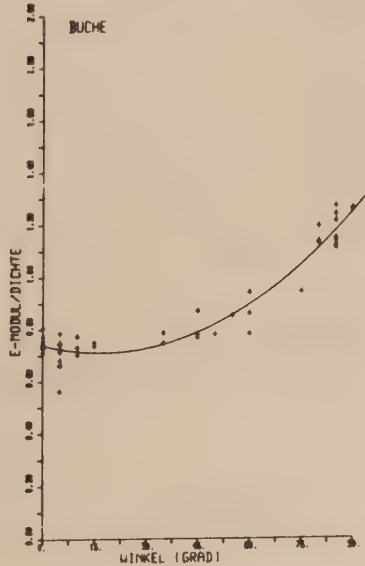
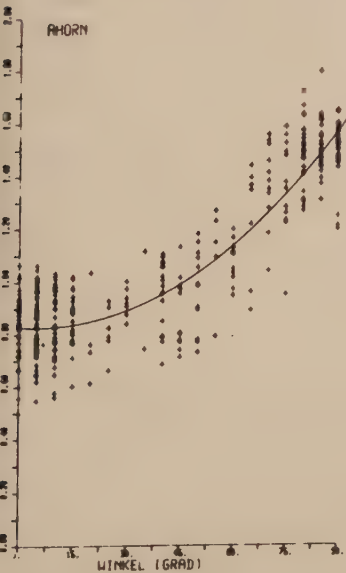
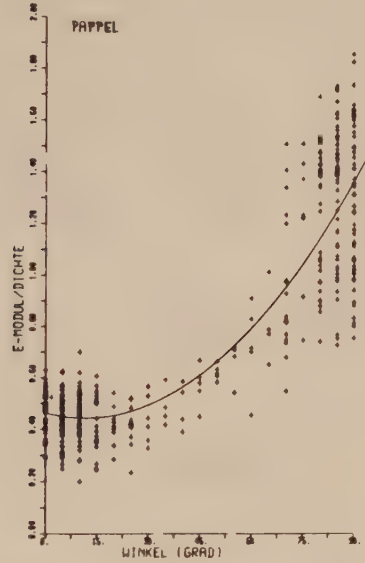
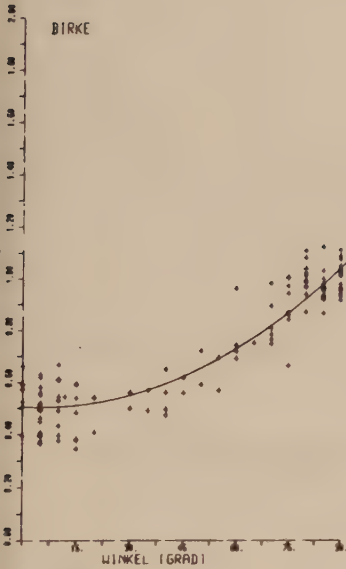


Abb. 82: Fortsetzung

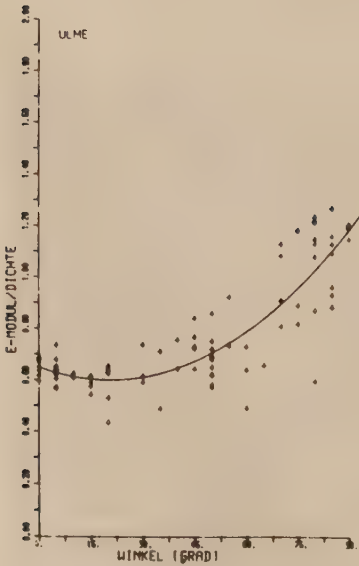
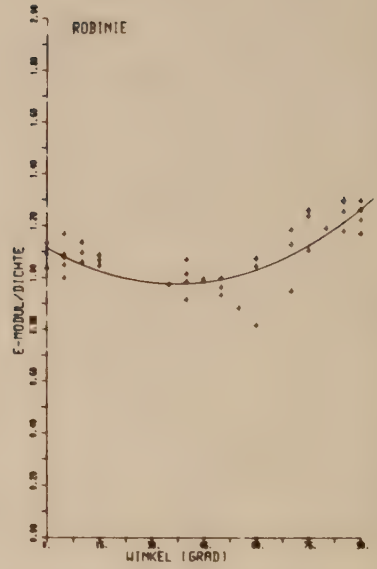
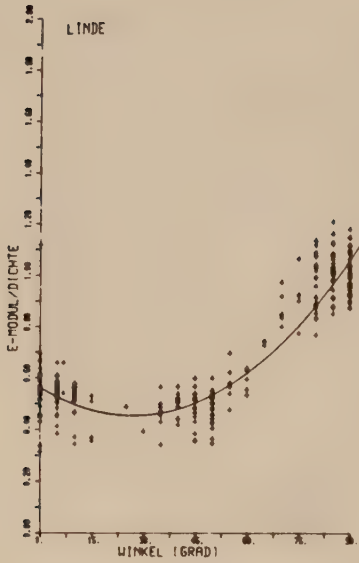
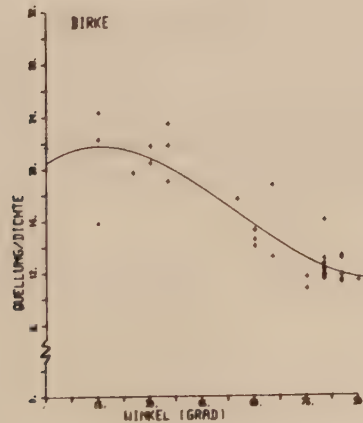
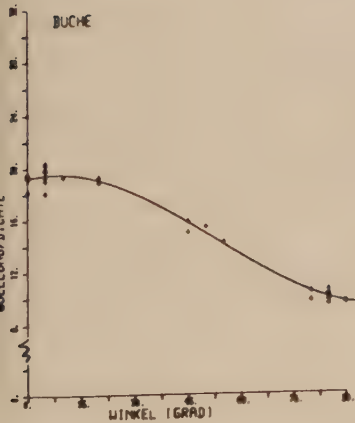
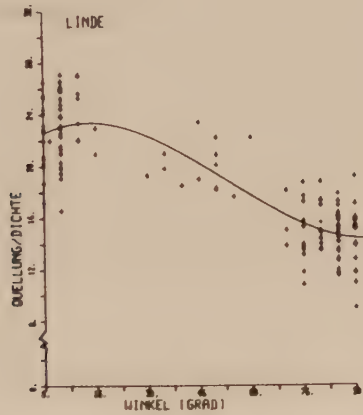
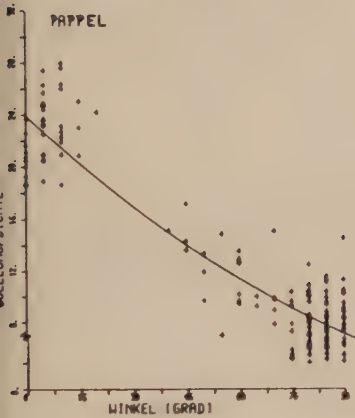


Abb. 83: Abhängigkeit des linearen maximalen spezifischen Quellmaßes quer zur Faser (α/r_0) von dem Winkel zum Jahrringverlauf bei Pappel, Linde, Buche und Birke



Danksagung

Bei der Erstellung dieser Arbeit kam mir die freundliche Hilfsbereitschaft Vieler zugute. Ich möchte an dieser Stelle allen mit Nachdruck danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. H. Schulz, der dieses Thema anregte und mich während der Durchführung dieser Arbeit mit Rat und Tat kräftig unterstützte.

Vom Institut für Holzforschung seien Frau R. Grünewald und Frau M. Pflug sowie die Herren Dr. G. Böhner, Dr. C. T. Bues, Dr. D. Grosser, R. Braun, H. Fuchs, E. Glas, A. Perschina, R. Rosin und B. Zimmer für ihre Hilfe gedankt.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Unterstützung dieses Forschungsprojektes.

Sehr verbunden bin ich auch den Herren Dr. G. Aas, D. Kohl und M. Weber für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie W. Weichselbaumer, der mich in die Kunst, einen Personal Computer einzusetzen, erfolgreich einführte.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Nadine Braquet für Ihre liebevolle Unterstützung herzlich bedanken.

Lebenslauf

Am 2.04.1951 wurde ich in Houffalize (Belgien) geboren.

Nach der "Ecole Primaire" besuchte ich von 1962 bis 1965 die "Ecole Moyenne de l'Etat" in Houffalize und anschließend das "Institut Ste-Marie" in Arlon. Dort legte ich 1970 das "Examen de Maturité" (Abitur) ab.

In der Zeit zwischen 1970 und 1977 war ich als Dachdecker tätig und leistete meinen Wehrdienst. Im August 1977 zog ich nach München und besuchte bis April 1978 einen Deutschkurs an der Ludwig-Maximilians-Universität in München.

An der Forstwissenschaftlichen Fakultät dieser Universität studierte ich Forstwissenschaft und schloß im Dezember 1984 mit dem Hauptdiplom ab. Seitdem bin ich am Institut für Holzforschung der Ludwig-Maximilians-Universität tätig.

Ich bin seit September 1977 verheiratet.

